

# پژوهش های عمران و محیط زیست

دوفصلنامه، سال پنجم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۸

بررسی تحلیلی ظرفیت برشی پانچ دال‌های تخت بتن مسلح با بازو تقویت‌شده با صفحات فولادی و گل‌میخ سید محمد عبداللهمی، امیر توانا املشی و ملک محمد رنجبر	۰۱-۲۰
مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو مقیاس کوچک و بزرگ برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای آن‌ها پریسا سرتاجی و عبدالرضا سروقد مقدم	۲۱-۳۳
بررسی اثر ارتفاع سازه در دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه‌های فولادی همراه با جداسازهای لاستیکی با هسته سربی پدرام حسینی، محمود حسینی و سید محمد عمران‌زاده	۳۵-۴۹
منحنی شکنندگی مخازن ذخیره‌سازی فولادی اتمسفریک متکی بر شمع مهدی شریفی، ابوالقاسم معزی و نسیم ثباتی	۵۱-۶۰
بررسی اثرات سازه زیرزمینی بر جابه‌جایی‌های سطح زمین تحت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت محسن ایثاری، رضا تارینژاد و سید کاظم رضوی	۶۱-۷۵
تحلیل و بررسی پتانسیل زمین‌لغزش به‌کمک مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی: محور قائن- افین در استان خراسان جنوبی) حسین نوفرستی، علی ویسکرمی و محمدجواد رحیم‌دل	۷۷-۸۸
تحلیل عددی حفر تونل‌های بزرگ‌مقطع و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: تونل راه‌آهن کوهین محور قزوین- رشت) رضا میکائیل، محمد عطایی، فرهنگ سرشکی و امیر جعفرپور	۸۹-۱۰۳
ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیل عددی اثر استفاده از باطنه‌های معدنی سیلیمانیت به عنوان درشت‌دانه بر مقاومت لغزشی و سختی مخلوط آسفالتی حسن محمدی انانی، محمد مهدی خبیری، حامد خانی سانج و فاطمه متین قهفرخی	۱۰۵-۱۱۹
شبیه‌سازی عددی جریان هوا و انتقال ذرات از سطح پشته‌های انباشت مواد اولیه و مقایسه اثرات تغییر شکل و سرعت بر میزان بادبردگی محمد کاظم مؤیدی و علی بشردوست	۱۲۱-۱۳۴
بررسی عددی جریان و ضریب دبی جریان بر روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل سمیه امامی و جواد پارسا	۱۳۵-۱۴۵
شبیه‌سازی عددی تأثیر هندسه شمع و فونداسیون بر روی آبشستگی موضعی در اطراف گروه‌پایه کج رامتین صبح خیز قومنی و علیرضا مردوخ پور	۱۴۷-۱۶۴
مدل‌سازی عددی اثر تغییر هندسه سازه راه‌ماهی بر جریان عبوری از بازشدگی قائم آن محمد شکراللهی، خسرو حسینی و سید فرهاد موسوی	۱۶۵-۱۷۶

به نام خدا



## پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست

مجله علمی

سال پنجم، شماره اول

بهار و تابستان ۱۳۹۸

صاحب امتیاز

دانشگاه قم

مدیر مسئول:

دکتر علی محمد رجیبی، استادیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی،  
دانشگاه تهران

سردبیر:

دکتر علی قنبری، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه  
خوارزمی.

دکتر سید روح الله حسینی واعظ، دانشیار، گروه مهندسی  
عمران، دانشگاه قم

ویراستار:

طاہره عارف زاده، کارشناس ارشد مهندسی عمران، گروه  
مهندسی عمران، دانشگاه قم

طرح روی جلد: سید محمد جواد حسینی واعظ

صفحه آرایبی: طاہره عارف زاده

ناظر چاپ: محمد رضا شجاعی

شاپا الکترونیکی: ۴۰۶x-۲۴۷۶

شاپا چاپی: ۴۰۵۱-۲۴۷۶



نشانی: قم، جاده قدیم اصفهان، دانشگاه قم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دفتر مجله پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست

کد پستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱

تلفن: ۰۲۵-۳۲۱۰۳۵۹۰

نمابر: ۰۲۵-۳۲۸۵۴۲۲۸

نشانی سایت: <http://cer.qom.ac.ir/>

پست الکترونیکی: [cer@qom.ac.ir](mailto:cer@qom.ac.ir)

قیمت: ۱۰۰۰۰۰ ریال

## هیأت تحریریه

دکتر مرتضی اسکندری قادی

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران

دکتر سید روح الله حسینی واعظ

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

دکتر ماشاء اله خامه چیان

استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر مهدی خداپرست

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

دکتر طاہر رجایی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

دکتر علی قنبری

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

دکتر وحید نورانی

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

## هیأت تحریریه بین‌المللی

**Janusz Wasowski**

Professor, National Research Council, Roma, Italy

**Hakim S. Abdelgader**

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of  
Engineering, University of Tripoli, Tripoli, Libyan Arab  
Jamahiriya



## مقالات این شماره

- ۱ بررسی تحلیلی ظرفیت برشی پانچ دال‌های تخت بتن مسلح با بازشو تقویت‌شده با صفحات فولادی و گل‌میخ  
سید محمد عبداللهی، امیر توانا املشی و ملک محمد رنجبر
- ۲۱ مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو مقیاس کوچک و بزرگ برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای آن‌ها  
پریسا سرتاجی و عبدالرضا سروقد مقدم
- ۳۵ بررسی اثر ارتفاع سازه در دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه‌های فولادی همراه با جداسازهای  
لاستیکی با هسته سربی  
پدرام حسینی، محمود حسینی و سید محمد عمرانی‌زاده
- ۵۱ منحنی شکنندگی مخازن ذخیره‌سازی فولادی اتمسفریک متکی بر شمع  
مهدی شریفی، ابوالقاسم معزی و نسیم ثباتی
- ۶۱ بررسی اثرات سازه زیرزمینی بر جابه‌جایی‌های سطح زمین تحت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت  
محسن ایثاری، رضا تارینژاد و سید کاظم رضوی
- ۷۷ تحلیل و بررسی پتانسیل زمین‌لغزش به کمک مدل‌سازی عددی (مطالعه موردی: محور قائن-افین در استان خراسان  
جنوبی)  
حسین نوفرستی، علی ویسکرمی و محمدجواد رحیم‌دل
- ۸۹ تحلیل عددی حفر تونل‌های بزرگ مقطع و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی (مطالعه  
موردی: تونل راه آهن کوهین محور قزوین-رشت)  
رضا میکائیل، محمد عطایی، فرهنگ سرشکی و امیر جعفرپور
- ۱۰۵ ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیل عددی اثر استفاده از باطله‌های معدنی سیلیمانیت به عنوان درشت‌دانه بر مقاومت  
لغزشی و سختی مخلوط آسفالتی  
حسن محمدی انائی، محمدمهدی خبیری، حامد خانی سانج و فاطمه متین قهفرخی
- ۱۲۱ شبیه‌سازی عددی جریان هوا و انتقال ذرات از سطح پشته‌های انباشت مواد اولیه و مقایسه اثرات تغییرشکل و  
سرعت بر میزان بادبردگی  
محمدکاظم مؤیدی و علی بشردوست
- ۱۳۵ بررسی عددی جریان و ضریب دبی جریان بر روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل  
سمیه امامی و جواد پارسا
- ۱۴۷ شبیه‌سازی عددی تأثیر هندسه شمع و فونداسیون بر روی آبشستگی موضعی در اطراف گروه‌پایه کج  
رامتین صبح خیز فومنی و علیرضا مردوخ پور
- ۱۶۵ مدل‌سازی عددی اثر تغییر هندسه سازه راه‌ماهی بر جریان عبوری از بازشدگی قائم آن  
محمد شکراللهی، خسرو حسینی و سید فرهاد موسوی



## درباره نشریه

نشریه علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه قم با عنوان «پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست» افتخار دارد که بتواند دستاوردهای علمی- پژوهشی محققان کشور را به نحو شایسته‌ای در اختیار علاقه‌مندان به امر پژوهش در تمامی زمینه‌های مهندسی عمران قرار دهد. این نشریه سعی دارد زمینه‌ای را برای مجموعه گسترده‌ای از مطالعات علمی و فنی فراهم کند تا نیازهای در حال تحول در جوامع مهندسی عمران را منعکس نماید.

مجوز انتشار این نشریه علمی در سال ۱۳۹۳ براساس مصوبه شماره ۹۳/۱۲۹۹ مورخ ۱۳۹۳/۱/۲۶ وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی صادر شده است. این نشریه به صورت دوفصلنامه به زبان فارسی به چاپ می‌رسد. تمامی مقالات منتشر شده در این نشریه تحت فرآیند داوری به صورت اطلاعات یک جانبه آشکار قرار گرفته‌اند. همچنین تمامی متون اصلی فارسی این مقالات به وسیله مشابهت‌یاب سمیم نور و متن انگلیسی چکیده آنها به وسیله مشابهت‌یاب iThenticate به منظور منحصربه‌فرد بودن این مطالعات، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در راستای تحقق دستیابی به سطوح بین‌المللی، درج شناسه دیجیتال مقاله (DOI) با پیش شماره اختصاصی ۱۰/۲۲۰۹۱ به صاحب امتیازی دانشگاه قم، برای کلیه مقالات منتشر شده در این نشریه، به صورت رایگان صورت می‌پذیرد.

به منظور تسهیل در دریافت مقالات، انجام داوری و پیگیری‌های بعدی، نویسندگان محترم بایستی ضمن ثبت‌نام در پایگاه نشریه، مقالات خود را از طریق سامانه ارسال نمایند. اعضای هیأت تحریریه نشریه پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست مصمم هستند که فرآیند مکاتبات و داوری مقالات در کوتاه‌ترین زمان ممکن صورت گیرد و نتیجه در اولین فرصت به اطلاع نویسندگان محترم برسد.

مخاطبان این نشریه تحت مجوز حق انتشار بین‌المللی و اجازه دسترسی ۴/۰ (CC BY 4.0) می‌توانند مطالب و یا قالب موجود را نسخه‌برداری و توزیع نمایند. همچنین دسترسی به مقالات این نشریه رایگان است (Open Access). نشریه پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست برای ارسال، داوری و چاپ مقاله از نویسندگان هزینه‌ای دریافت نمی‌کند.

## اصول اخلاقی نشریه و مصادیق سوء رفتار در نشر

سیاست‌های اخلاقی نشریه «پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست» براساس اصول کمیته بین‌المللی اخلاق نشر (COPE) و رعایت منشور اخلاقی نشریات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری می‌باشد که سردبیر نشریه، خوانندگان، نویسندگان، داوران و دبیران علمی به آن متعهد هستند. براساس این منشور اخلاقی، نشریه برای انواع مقالات ارسال شده، صلاحیت تعیین شماره مورد نظر برای چاپ را دارد. به‌علاوه، مؤلفان، داوران، دبیران علمی و سردبیر هنگام همکاری با نشریه «پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست» باید این اصول اخلاقی را رعایت کنند. مشروح اصول کمیته بین‌المللی اخلاق نشر (COPE)، در آدرس <http://publicationethics.org> قابل دسترسی می‌باشد.

### وظایف و مسئولیت‌های سردبیر و دبیران علمی:

۱. سردبیر و دبیران علمی این نشریه وظیفه و مسئولیت قبول یا رد مقاله را به‌عهده می‌گیرند.
۲. سردبیر و دبیران علمی این نشریه باید رونوشت‌های ارسال شده را تا هنگام انتشار، محرمانه نگه دارند.
۳. سردبیر و دبیران علمی تصمیمات نهایی مورد نظر در رابطه با انتشار یا عدم انتشار یک رونوشت را اتخاذ می‌کنند.
۴. سردبیر و دبیران علمی این نشریه باید اصل بینامی داوران را حفظ کنند.
۵. سردبیر و دبیران علمی این نشریه باید از تعارض منافع جلوگیری کنند.
۶. سردبیر و دبیران علمی این نشریه ملزم به رعایت صیانت علمی و تلاش برای رفع نیازهای علمی خوانندگان خود هستند.
۷. سردبیر و دبیران علمی این نشریه سرقت ادبی و تقلب و کلاهبرداری‌های احتمالی را شناسایی کنند و در موارد نیاز اصلاحات، توضیحات، و واپس‌گیری‌ها و عذرخواهی‌ها را ارائه دهند.
۸. سردبیر و دبیران علمی این نشریه باید به محتوای پژوهشی مرتبط، متمرکز و محدود باشند.
۹. سردبیر و دبیران علمی این نشریه نباید اطلاعات رونوشت‌ها را برای افرادی غیر از نویسندگان، نویسنده مسئول و داوران فاش کنند.
۱۰. رونوشت‌های منتشر نشده توسط سردبیر و دبیران علمی و یا اعضای دیگر برای مقاصد شخصی مورد استفاده قرار نخواهد گرفت.

### وظایف و مسئولیت‌های داوران:

۱. داوران این نشریه می‌بایست با سردبیر و دبیران علمی برای تصمیم‌گیری در رابطه با انتشار رونوشت‌های ارسال شده همکاری کنند.
۲. داوران باید نظرات خود را به سردبیر و دبیران علمی برای تصمیم‌گیری در رابطه با انتشار یا عدم انتشار رونوشت، در زمان لازم ارائه دهند.
۳. داوران دعوت شده به این نشریه مسئولیت محرمانه نگه داشتن رونوشت‌های ارسال شده را بر عهده دارند.
۴. داوران ملزم به رعایت محرمانه نگه داشتن رونوشت‌های ارسال شده و عدم استفاده از اطلاعات آنان برای مقاصد شخصی هستند.
۵. نظرات داوران در رابطه با رونوشت‌های ارسال شده باید فنی و تخصصی باشد.
۶. داوران نباید رونوشت‌هایی که در آنها تعارض علایق با یکی از نویسندگان، شرکت‌ها، یا مؤسسات وجود دارد را داوری کنند.

۷. داوران باید تعارض منافع را بیان و از رخداد آن جلوگیری کنند.

### وظایف و مسئولیت‌های نویسندگان:

۱. رونوشت‌ها باید فقط به زبان فارسی و با نگارش صحیح و با اصطلاحات مناسب ارسال شود.
۲. رونوشت‌ها نباید در جای دیگری (بجز در قالب چکیده یا بخشی از یک سخنرانی، مقاله مروری، یا پایان‌نامه) چاپ شده باشند یا هم‌زمان توسط نشریه دیگری تحت بررسی باشند.
۳. نویسنده مسئول باید از رضایت دیگر مؤلفان همکار مطمئن بوده و نوشتار به تایید کلیه نویسندگان رسیده باشد.
۴. یکی دیگر از مسئولیت‌های نویسندگان، حصول اطمینان و کسب اجازه موسسه ایست که رونوشت ارسال شده مربوط به آن است.
۵. یکی از شرایط ارسال رونوشت اینست که مؤلفان اجازه ویرایش آن را برای قابلیت خوانایی بیشتر بدهد.
۶. از نویسندگان انتظار می‌رود تا حامی مالی را برای اجرا و آماده‌سازی روند تحقیق به طور خلاصه بیان کنند.
۷. فرم تعهد اخلاقی و حق نشر می‌بایست که توسط مؤلفان قبل از پذیرش مقالات امضا و تایید شود.
۸. در نشریه‌های دسترسی آزاد، مؤلفان حق مالکیت مقاله خود را دارند اما در کنار آن به عموم افراد اجازه دانلود، چاپ، و توزیع مقاله خود را نیز می‌دهند.
۹. همه مؤلفان یک رونوشت می‌بایست بر سر اینکه نویسنده مسئول فرآیندهای بازنگری بعدی را پس از ارسال رونوشت و تایید نهایی پیش از چاپ بر عهده گیرد، توافق کنند.
۱۰. هنگامی که نویسنده یا نویسندگان، رونوشت خطای مهمی را در کارشان دیدند، لازم است سریعاً دبیر علمی نشریه را برای تصحیح آن مطلع کنند.
۱۱. از آنجاکه سرقت ادبی یکی از خطاهای جدی و غیراخلاقی محسوب می‌شود، همه نویسندگان می‌بایست بدانند که رونوشت‌های ارسال شده به این نشریه ممکن است توسط نرم‌افزارهای سرقت ادبی مورد تحلیل قرار گیرد.
۱۲. همه نویسندگان لازم است فرآیند ارسال یک رونوشت را در این نشریه مطالعه کنند.

### مصادیق نقض اصول اخلاقی انتشار توسط نویسندگان:

۱. سرقت ادبی: سرقت ادبی به معنای استفاده عمدی از مقالات یا ایده‌های شخص دیگر به نام خود است. حتی استفاده از یک جمله شخص دیگر یا جملات قبلی خود بدون ذکر منبع، سرقت محسوب می‌شود. تمامی رونوشت‌های ارسال شده به این نشریه توسط نرم‌افزارهای سرقت ادبی مورد بازبینی قرار می‌گیرند.
۲. داده‌سازی و تحریف: داده‌سازی هنگامی است که محقق در عمل، مطالعه‌ای را انجام نداده اما داده و نتیجه‌گیری ارائه می‌دهد. تحریف نیز هنگامی رخ می‌دهد که تحقیقی را انجام داده اما داده‌ها و نتایج آن را تغییر می‌دهد.
۳. ارسال همزمان: هنگامی است که یک رونوشت به دو نشریه ارسال می‌شود.
۴. ارسال دو نسخه‌ای (المثنی): هنگامی رخ می‌دهد که دو یا چند مقاله دارای فرضیات، داده‌ها و نتایج یکسان هستند.
۵. ارسال تکراری (اضافی): به معنی تقسیم یک مطالعه به مقالات متعدد و ارسال آنها می‌باشد.
۶. سهمیم کردن نادرست نویسنده دیگر: همه نویسندگان لیست شده در مقاله می‌بایست در انجام آن سهمیم باشند.
۷. دستکاری منابع: هنگامی است که در قسمت پایانی یک رونوشت منابع متعددی ذکر می‌شود، در حالی که در محتوای متن نامی از آنها برده نشده است.

## اهداف

- تقویت رشد تحقیقات علمی در بین مهندسان و دانشمندان ایرانی
- ایفای نقش رابطی جهت در دسترس قرار دادن ثمره این تحقیقات در جوامع ملی و بین‌المللی مهندسی عمران
- تمرکز در تمام زمینه‌های مهندسی عمران
- انتشار تحقیقات با کیفیت بالا از جوامع دانشگاهی همراه با نرخ استناد بالا و تأثیرگذاری در دستیابی به مسیرهای مرتبط با صنعت

نشریه «پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست» یک نشریه علمی است که در حوزه مهندسی عمران به نشر مقالات علمی می‌پردازد. محققان و پژوهشگران محترم می‌توانند نتایج تحقیقات علمی و وزین خود در هر یک از گرایش‌ها و زمینه‌های مرتبط با مهندسی عمران را جهت بررسی، داوری و چاپ از طریق سامانه آنلاین به نشریه ارسال نمایند.

## محورهای پژوهشی نشریه

مهمترین محورهای پژوهشی مجله پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست به شرح زیر است:

### مهندسی سازه و زلزله

- بهینه سازی
- مقاوم سازی
- روش‌های عددی در مهندسی سازه
- پایش سلامت سازه‌ها و تشخیص خرابی
- روش‌های طراحی سازه
- مطالعات آزمایشگاهی

### ژئوتکنیک

- اندرکنش خاک و سازه
- مکانیک خاک و پی
- مهندسی تونل
- ژئوتکنیک و مهندسی زلزله

### سازه‌های هیدرولیکی و دریایی

- اندرکنش آب و سازه
- مهندسی سد

- هیدرولیک زهکشی
- مکانیک انتقال رسوب
- رسوب و انتقال آلودگی

#### **حمل و نقل و راه و ترابری**

- سیستم‌های هوشمند حمل و نقل
- زیرساخت‌های حمل و نقل
- مهندسی پل

#### **منابع آبی و محیط‌زیست**

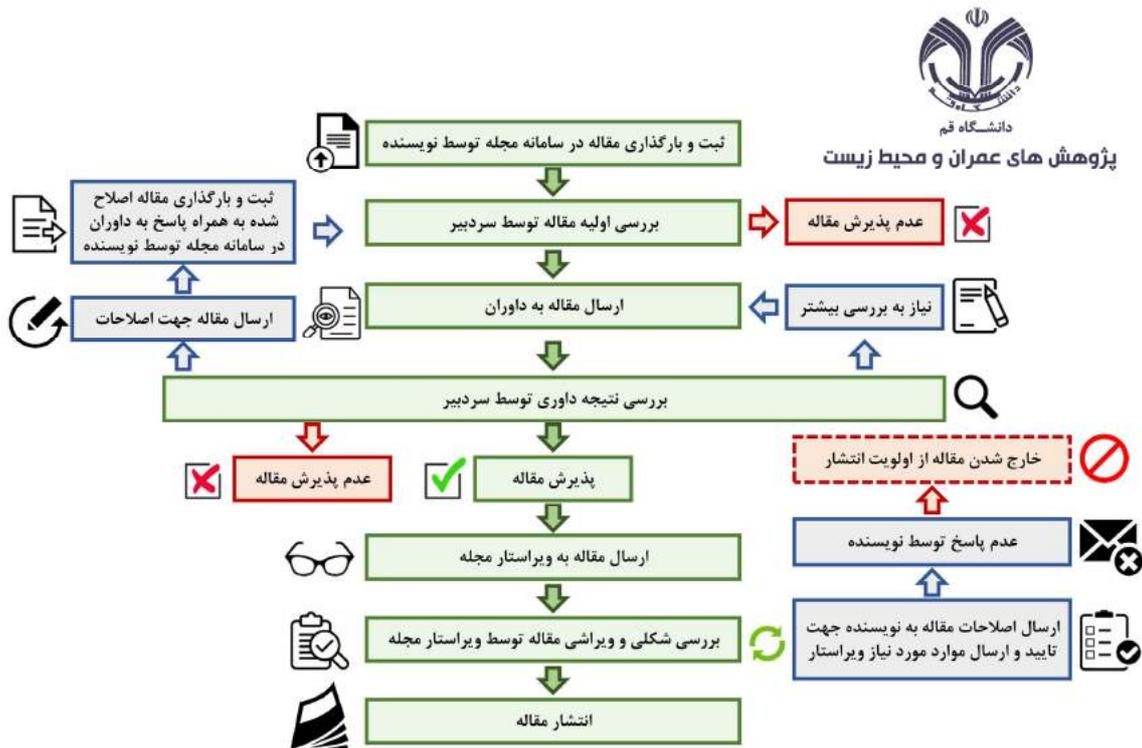
- هیدرولوژی و برنامه‌ریزی منابع آب
- توسعه پایدار، ارزیابی زیست محیطی و اقتصادی
- مسائل مربوط به سلامت آب

#### **مدیریت پروژه و ساخت**

- کنترل پروژه و ابزار دقیق
- بهره‌برداری و نگهداری
- فناوری ساخت و ساز، اقتصاد و مدیریت
- فناوری‌های اطلاعات در ساخت و ساز

## فرآیند پذیرش مقالات

فرآیند پذیرش مقاله در این نشریه از ارسال تا چاپ نهایی مطابق با نمودار فلودیوگرام زیر صورت می‌پذیرد. مدت زمان این فرآیند، به قبول داوری توسط داوران محترم، ارسال نظرات داوری و پاسخگویی به نظرات داوران توسط نویسندگان بستگی دارد.



## بررسی تحلیلی ظرفیت برشی پانچ دال‌های تخت بتن مسلح با باز شو تقویت‌شده با صفحات فولادی و گل‌میخ

استفاده از دال‌های تخت بتن مسلح که به‌طور مستقیم بر روی ستون قرار می‌گیرند، در سیستم‌های سازه‌ای بسیار رایج است. اتصال ستون- دال تخت، همواره در معرض ترکیب لنگر خمشی و تنش برشی قرار می‌گیرد که سوراخ شدگی (پانچ) و شکست برشی را به دنبال خواهد داشت. از آنجاکه در دال‌های تخت، بار کف مستقیماً از دال به ستون منتقل می‌شود، تنش‌های برشی قابل‌ملاحظه‌ای در دال به‌وجود می‌آید و پدیده برش پانچ در محل اتصال دال به ستون رخ می‌دهد که در صورت وجود باز شو در دال، احتمال وقوع پدیده پانچ بیشتر می‌شود. این پژوهش، مطالعه عددی اثر تقویت دال‌های تخت بتن مسلح دارای باز شو با صفحات فولادی خارجی و گل‌میخ بر روی ظرفیت برشی پانچ آن می‌باشد. به این منظور، چند نمونه دال تخت بتن مسلح دارای باز شو تقویت‌شده با صفحات فولادی خارجی با ابعاد و ضخامت مختلف و همچنین قطر، طول، تعداد و آرایش متفاوت گل‌میخ‌ها با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل و نتایج حاصل از نمونه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردید. ملاحظه می‌شود که تقویت دال‌های مورد بررسی، باعث بهبود وضعیت سختی و افزایش ظرفیت برشی پانچ گردیده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان این بهبود وضعیت وابسته به ابعاد و ضخامت ورق و قطر، طول، تعداد و آرایش گل‌میخ‌ها می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب در فرآیند شبیه‌سازی، روش اجزای محدود می‌تواند ابزار مناسبی جهت تحلیل و طراحی ایمن و بهینه دال‌های بتن مسلح باشد.

**واژگان کلیدی:** دال تخت، برش پانچ، صفحه فولادی، باز شو، گل‌میخ.

سید محمد عبداللهی

باشگاه پژوهشگران جوان و  
نخبگان، واحد رشت، دانشگاه آزاد  
اسلامی، رشت، ایران.  
پست الکترونیک:  
sm.abdolahi71@gmail.com

امیر توانا املشی

باشگاه پژوهشگران جوان و  
نخبگان، واحد رشت، دانشگاه آزاد  
اسلامی، رشت، ایران.  
پست الکترونیک:  
amir.tavana.amlashi@gmail.com

ملک محمد رنجبر\*

دانشیار گروه مهندسی عمران،  
دانشکده فنی، دانشگاه گیلان،  
رشت، ایران.  
پست الکترونیک:  
ranjbar@guilan.ac.ir

### ۱- مقدمه

لنگر خمشی و تنش برشی قرار می‌گیرد که سوراخ شدگی (پانچ) و شکست برشی را به دنبال خواهد داشت. از آنجاکه در دال‌های تخت، بار کف مستقیماً از دال به ستون منتقل می‌شود، تنش‌های برشی قابل‌ملاحظه‌ای در دال به‌وجود می‌آید به‌طوری‌که در بسیاری موارد ضخامت دال در محل ستون‌ها، جوابگوی این تنش‌ها نمی‌باشد و پدیده برش پانچ در محل اتصال دال به ستون رخ می‌دهد. این شکست نامطلوب است، زیرا بدون هشدار به وقوع می‌پیوندد و ممکن است منجر به خرابی تدریجی دال شود. به سبب تنش کششی زیاد، ترک‌های قطری پیرامون ستون شکل می‌گیرد. سطح شکست از کف دال

استفاده از دال‌های تخت بتن مسلح که به‌طور مستقیم بر روی ستون قرار می‌گیرند در سیستم‌های سازه‌ای بسیار رایج است. فواید استفاده از سیستم سازه‌ای دال- ستون به خوبی شناخته شده است و در ساختمان‌های با کاربری متفاوت بسیار استفاده می‌گردد [۱]. اتصال ستون- دال تخت، همواره در معرض ترکیب

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۲۳، بازنگری ۱۳۹۸/۰۵/۰۴، پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱.  
(DOI): 10.22091/cer.2019.3982.1139 شناسه دیجیتال

بر ستون گسترش می‌یابد که به صورت قطری رو به سطح بالا (رأس) است [۲]. در گذشته، ظرفیت برش پانچ دال‌ها به صورت گسترده از دیدگاه‌های تجربی و نظری مورد مطالعه قرار گرفته است [۳-۹].

وجود بازشو در دال تخت به دلایل مختلفی از قبیل راه‌پله یا آسانسور، عبور لوله‌های انتقال گاز، برق، آب و تهویه مطبوع اجتناب‌ناپذیر است. اثرات وجود بازشو بر ظرفیت برشی دال تخت در محل اتصالات دال-ستون به دلیل آسیب‌پذیری این ناحیه باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد [۱]. به‌طور کلی، روش‌هایی چون استفاده مشترک از صفحات فولادی و یا الیاف و پلیمرهای تقویت‌شده (FRP<sup>۱</sup>) برای تقویت دال‌ها از جمله روش‌های اثرگذار و مورد توجه بوده است. پژوهشگران، تحقیقاتی به‌صورت آزمایشگاهی برای تقویت دال بتن مسلح تحت بارگذاری پانچ با استفاده از صفحات فولادی و گل‌میخ انجام دادند. آنان استفاده از صفحه‌هایی با ابعاد متفاوت و تعداد گل‌میخ‌های مختلف را در مطالعه خود در نظر گرفتند. تقویت دال از طریق ترکیب صفحات و گل‌میخ‌های فولادی که توسط آن‌ها انجام شد، باعث افزایش بار نهایی در نمونه‌های مختلف از ۳۶ درصد تا ۶۵ درصد بسته به آرایش صفحات و تعداد استفاده از گل‌میخ‌های فولادی بوده است [۱۰]. سیم<sup>۲</sup> و همکاران، در تحقیقات آزمایشگاهی خود نشان دادند که می‌توان با استفاده از صفحات فولادی خارجی، ظرفیت تحمل بار و سختی خمشی پانل‌های بتن مسلح عرشه پل را در برابر برش پانچ به مقدار قابل‌توجهی افزایش داد [۱۱]. در مورد ظرفیت برشی پانچ دال‌های با بازشو نیز تحقیقات آزمایشگاهی از مدت‌ها پیش صورت گرفته است. سیلوا<sup>۳</sup> و همکاران، در مطالعه خود به تحلیل آزمایشگاهی ۹ دال بتن مسلح مربعی (عرض: ۱۸۰۰ میلی‌متر؛ ضخامت: ۱۳۰ میلی‌متر) تحت بارگذاری در مرکز صفحه دال پرداختند.

متغیرهای اصلی نمونه‌های آنها دو بازشو مربعی (۱۵۰ میلی‌متر) در مجاورت کوچک‌ترین وجه ستون و استفاده از آرماتور برشی در اطراف ستون بود. نتایج نشان داد که بازشوهای مجاور ستون بر مقاومت برشی پانچ تأثیر می‌گذارند، در حالی‌که استفاده صحیح از آرماتور برشی می‌تواند این کاهش مقاومت را به حداقل برساند و حتی جبران کند [۱۲].

محققان، در تحقیق خود ضمن بررسی اثربخشی تقویت اتصال دال تخت با استفاده از ورق پلیمر فیبر کربن تقویت شده (CFRP<sup>۴</sup>) نشان دادند که تقویت دال بدون بازشو، ظرفیت برش پانچ را ۱۱٪ افزایش داد. در حالی‌که در مورد دال‌های دارای بازشو، این تقویت، ظرفیت برش پانچ را تا ۲۳٪ افزایش می‌دهد [۱۳]. در پژوهشی دیگر نیز به‌صورت تجربی به بررسی تقویت برش پانچ دال تخت بتن مسلح با سیستم‌های پلیمری تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) پرداخته شده است. در این تحقیق، حداکثر افزایش ظرفیت پانچ ۶۷٪ با استفاده از تکنیک‌های تقویت پیشنهادی به‌دست آمد، که امکان تبدیل شکست ترد به یک شکست شکل‌پذیر خمشی را فراهم نمود [۱۴]. ناوارو<sup>۵</sup> و همکاران، یک مدل عددی غیرخطی مبتنی بر المان محدود برای مطالعه پدیده برش پانچ در دال بتن مسلح ارائه دادند. این دال در نرم افزار ABAQUS شبیه‌سازی و مدل با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. کالیبراسیون نیز با استفاده از برخی نتایج تجربی از پایگاه داده ACI برای آزمایش‌های پانچ دال بتن مسلح صورت گرفت. سپس یک تحلیل پارامتری برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و مکانیکی که سازه دال-ستون کلاسیک را تعریف می‌کرد، انجام شد [۱۵]. ریکر<sup>۶</sup> و همکاران، با بررسی بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC<sup>۷</sup>) در محدوده پر تنش اتصال دال

<sup>4</sup>- Carbon-fiber-reinforced polymer

<sup>5</sup>- Navarro

<sup>6</sup>- Ricker

<sup>7</sup>- Ultra-High Performance Concrete

<sup>1</sup>- Fiber Reinforced Polymer

<sup>2</sup>- Sim

<sup>3</sup>- Silva

بازشو را بر کاهش مقاومت برشی پانچ دال بررسی نمودند [۲۱، ۲۲ و ۲۳].

تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته در مورد اثر بازشو در کاهش ظرفیت و تأثیر آن در تغییر شکل دال‌ها، به دلایل اقتصادی از محدودیت‌هایی برخوردار می‌باشند. امروزه استفاده از روش‌های تئوری و کلاسیک تحلیل و آنالیز سازه‌ها برای تمامی انواع اشکال، المان‌ها با شرایط مرزی و بارگذاری‌های مختلف امکان‌پذیر نبوده و نیازمند روش‌هایی دقیق و در عین حال جامع برای تعیین تنش و تغییر شکل در سازه‌ها هستیم. در بین روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، روش‌های عددی به دلیل حل دقیق مدل‌هایی با هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری پیچیده و همچنین هزینه بسیار کمتر در مقایسه با تحقیقات آزمایشگاهی جزو پرکاربردترین روش‌ها در حل مسائل مهندسی است. در پژوهش حاضر، به‌عنوان روشی جدید جهت تقویت و افزایش ظرفیت برشی پانچ دال‌های تخت دارای بازشو اثر تقویت آن‌ها با صفحات فولادی و گل‌میخ، با روش اجزای محدود و در نرم‌افزار ABAQUS 2016 مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تأثیر هر یک از متغیرها بر ظرفیت برشی پانچ نمونه‌ها و ارائه رابطه تحلیلی جهت پیش‌بینی ظرفیت برشی پانچ دال تخت دارای بازشو نیز در این پژوهش انجام شده است.

## ۲- مدل‌سازی

در این پژوهش، برای مدل‌سازی دال دارای بازشو از نمونه آزمایشگاهی مرجع [۲۴] برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد که در آن دال مربعی با طول ضلع ۱۰۰۰ و ضخامت ۷۰ میلی‌متر به‌کار برده شده است و مقطع ستون نیز مربعی و با طول ضلع ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در تمام نمونه‌ها از یک شبکه میلگرد تحتانی به قطر ۴ و فاصله ۷۵ با عمق مؤثر متوسط ۵۴ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌ها با استفاده از بتن نرمال با مقاومت فشاری ۳۵/۵

به ستون نتیجه گرفتند که دال‌های با UHPC به‌طور قابل‌توجهی به بار شکست بالاتری نسبت به نمونه‌های آزمون بدون UHPC رسیده‌اند [۱۶].

اثر وجود و عدم وجود میلگرد برشی و بازشو و وجود یک بازشو یا دو بازشو در دو جهت بر روی ۲۰ دال مربعی بتن مسلح در پژوهشی دیگر انجام گرفت. از این آزمایش نویسنده به این نتیجه رسید که استفاده از میلگرد برشی در دال‌های با بازشو باعث ۸۶٪ افزایش مقاومت نسبت به دال مشابه با بازشو و بدون میلگرد برشی می‌شود و به دال کمک می‌کند که حداقل به مقاومت برشی پانچ برابر با دال مشابه بدون بازشو برسد [۱۷]. محققان، در مطالعه عددی خود به بررسی رفتار پانچ دال تخت بتن خودمتراکم تحت تقویت‌شده با فیبر فولاد تحت بار مرکزی پرداختند. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده دقت بالای آن‌ها در پیش‌بینی رفتار نیرو-جابه‌جایی آزمایشگاهی بود. نوع شکست مشاهده شده به‌صورت آزمایشگاهی نیز در شبیه‌سازی‌های عددی پیش‌بینی شد [۱۸]. صفایی<sup>۸</sup> و همکاران، به توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN<sup>۹</sup>) برای پیش‌بینی مقاومت برشی پانچ دال‌های تخت بتن مسلح پرداختند. آن‌ها همچنین آیین‌نامه‌های طراحی فعلی برای پیش‌بینی ظرفیت برش پانچ دال‌های تخت بتن مسلح را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی منتشرشده در پیشینه تحقیق مورد ارزیابی قرار دادند [۱۹]. پژوهشگران در تحقیقی، مقاومت برش پانچ دال‌های تخت را با و بدون تقویت‌کننده‌های برشی و براساس یک مدل برش تیر مورد بررسی قرار دادند. متغیرهای این پژوهش، محل قرارگیری ستون‌ها (مرزی یا گوشه)، جنس فیبر فولادی و تقویت دال با FRP و یا سیستم‌های مختلف تقویت بود [۲۰]. تحقیقات آزمایشگاهی دیگری از جمله وجود بازشو مربعی در مجاورت ستون انجام شده است که همگی اثر وجود

<sup>۸</sup>- Safiee

<sup>۹</sup>- Artificial Neural Networks

مسلح دارای بازشو تقویت‌شده با صفحات فولادی خارجی و گل‌میخ در نرم‌افزار تحت بارگذاری قرار گرفت. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

مگا پاسکال ساخته شد. در این مقاله دو نمونه دال تخت بتن مسلح، یک نمونه با بازشو و دیگری بدون بازشو به‌عنوان نمونه شاهد و سپس چند نمونه دال تخت بتن

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده

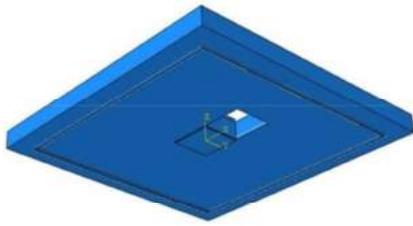
نمونه	ابعاد بازشو (mm)	اندازه صفحه فولادی (mm)	ضخامت صفحه فولادی (mm)	قطر گل‌میخ (mm)	طول گل‌میخ (mm)	تعداد گل‌میخ	آرایش گل‌میخ
S0	-	-	-	-	-	-	-
S1	۱۵۰×۱۵۰	-	-	-	-	-	-
S2	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۶	۴۰	۱۶	مربعی نوع ۱
S3	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۶	۵۰	۱۶	مربعی نوع ۱
S4	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۱۰	۴۰	۱۶	مربعی نوع ۱
S5	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۶	۴۰	۲۵	مربعی نوع ۱
S6	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۶	۴۰	۳۶	مربعی نوع ۱
S7	۱۵۰×۱۵۰	۲۰۰×۲۰۰	۴	۶	۴۰	۱۶	مربعی نوع ۱
S8	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۶	۶	۴۰	۱۶	مربعی نوع ۱
S9	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۶	۴۰	۱۶	مربعی نوع ۲
S10	۱۵۰×۱۵۰	۱۵۰×۱۵۰	۴	۶	۴۰	۱۶	دایره‌ای

(شکل ۱- الف) و همچنین نحوه مدل‌سازی تکیه‌گاه و صفحه فولادی در زیر دال (شکل ۱- ب) نشان داده شده است. المان solid جهت مدل‌سازی گل‌میخ‌ها و صفحه فولادی استفاده گردیده است. فرض شده است که قید کامل بین گل‌میخ‌ها و بتن اطرافش وجود داشته باشد و از قید Embedded region برای معرفی اندرکنش میان گل‌میخ و بتن استفاده شده است. قید Tie نیز برای معرفی اندرکنش میان صفحه فولادی و بتن به‌کار رفته است.

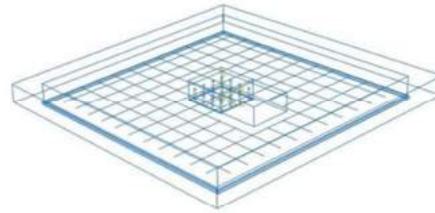
برای مدل‌سازی آرماتورها فرض شده است که قید کامل بین میلگرد و بتن اطرافش وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، در مدل‌سازی اجزای محدود از اثرات لغزش میان بتن و میلگردهای مدفون در دال صرف‌نظر شده است. همانند گل‌میخ‌ها از قید Embedded region برای معرفی اندرکنش میان آرماتورها و بتن استفاده شده است. مدول الاستیسیته فولاد مصرفی ۲۰۰ گیگاپاسکال و تنش کششی نهایی آن ۵۰۰ گیگاپاسکال می‌باشد.

در این پژوهش، در مدل‌سازی دال‌ها از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن استفاده شده است [۲۵]. برای مدل‌سازی دال بتنی از المان solid استفاده گردیده است. همچنین برای مش‌بندی دال از تکنیک Sweep و با الگوریتم Medial axis با سایز ۵ استفاده شده است. در این تحقیق، برای تعریف رابطه تنش- کرنش بتن، مدل Mander به‌کار برده شده است [۲۶]. مدول الاستیسیته بتن مورد استفاده ۲۴ گیگاپاسکال و مقاومت فشاری آن ۳۵/۵ مگاپاسکال می‌باشد. تکیه‌گاه زیر دال همانند شرایط آزمایشگاهی به‌صورت نشان داده شده در شکل ۱ مدل‌سازی شد و با معرفی اندرکنش مناسب میان دال بتنی و تکیه‌گاه، شرایط مرزی به تکیه‌گاه زیر دال به‌صورت مفصلی اعمال گردید که امکان جابه‌جایی نمونه‌ها در راستای محورهای X، Y و Z وجود نداشته باشد.

در شکل ۱، هندسه مدل ایجاد شده در نرم‌افزار، شامل نحوه آرماتورگذاری دال بتنی و قرارگیری گل‌میخ‌ها



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) نحوه آرماتورگذاری دال بتنی و (ب) نحوه مدل‌سازی تکیه‌گاه دال

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی آرماتورها از المان wire و برای معرفی رابطه تنش- کرنش فولاد از مدل Simple استفاده شده است. مشخصات بتن و فولاد

جدول ۲- مشخصات بتن

چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	مقاومت فشاری (Mpa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Gpa)
۲۴۰۰	۳۵/۵	۰/۲	۲۴

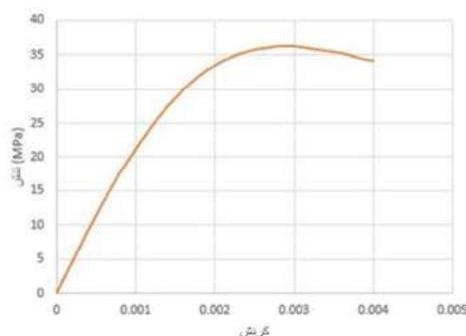
جدول ۳- مشخصات فولاد

چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	تنش تسلیم (Mpa)	تنش کششی نهایی (Mpa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (Gpa)
۷۸۵۰	۳۴۰	۵۰۰	۰/۳	۲۰۰

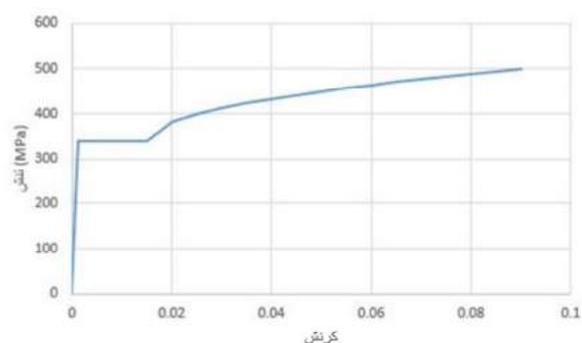
مدل‌سازی شده‌اند. نمونه S0 فاقد بازشو و نمونه S1 دارای بازشو در بر ستون به ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتی‌متر می‌باشند. سایر نمونه‌ها توسط صفحه فولادی و گل‌میخ در محل ستون (که بیشترین احتمال برش پانچ وجود دارد) تقویت شدند.

شکل ۲، منحنی تنش- کرنش بخش فشاری بتن و منحنی رفتاری فولاد را که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت، نشان می‌دهد.

پلان مدل‌های ایجاد شده در نرم‌افزار در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، دو نمونه S0 و S1 به‌عنوان نمونه شاهد

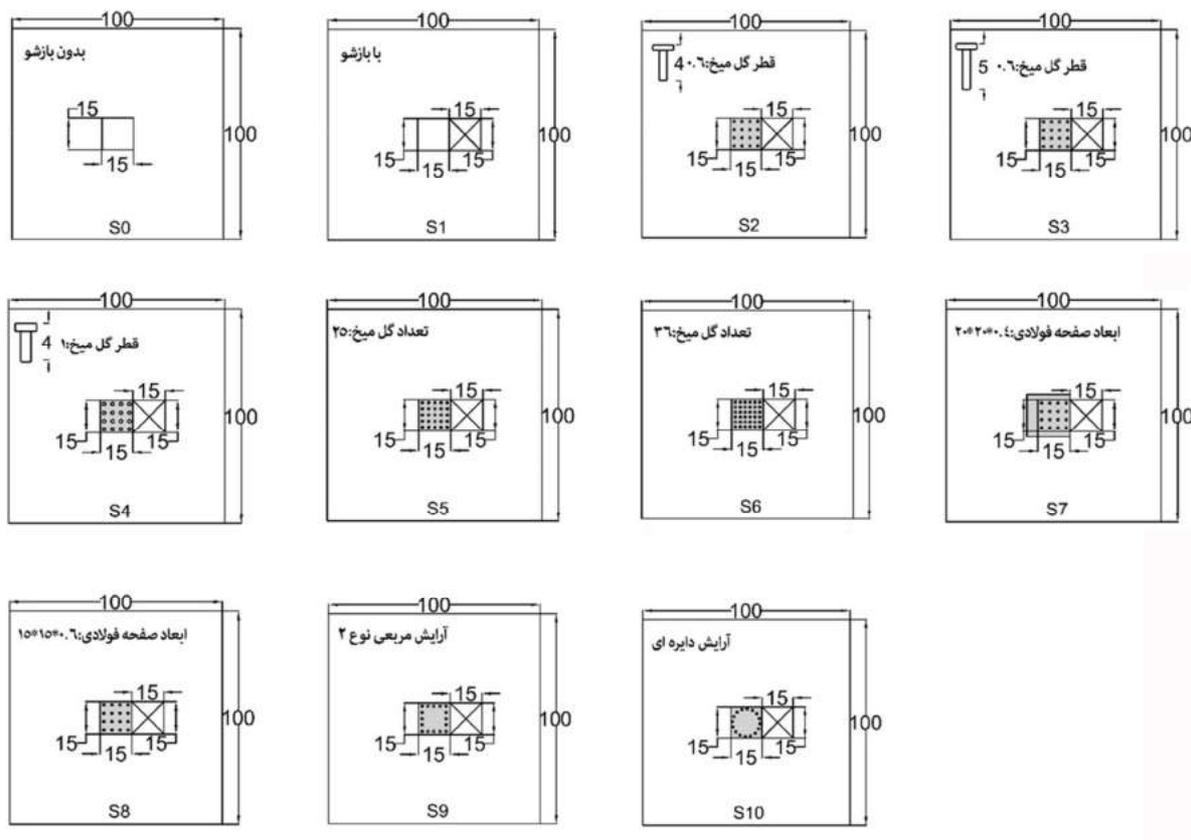


(ب)



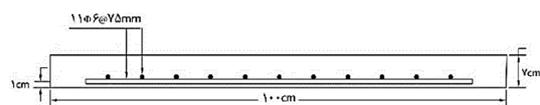
(الف)

شکل ۲- (الف) منحنی تنش- کرنش بخش فشاری بتن و (ب) منحنی رفتاری فولاد

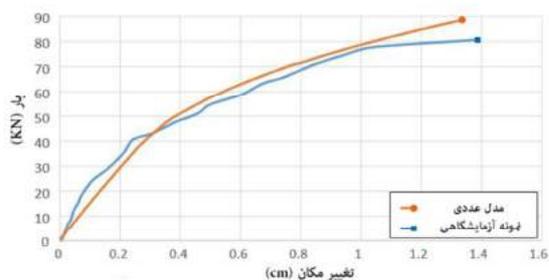


شکل ۳- پلان مدل‌های ایجاد شده در نرم‌افزار

ستون استفاده گردید. هندسه مدل آزمایشگاهی Oukaili در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، منحنی بار- تغییرمکان مرکز دال مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار با منحنی بار- تغییرمکان حاصل از نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد.



شکل ۴- هندسه مدل آزمایشگاهی Oukaili [۲۴]



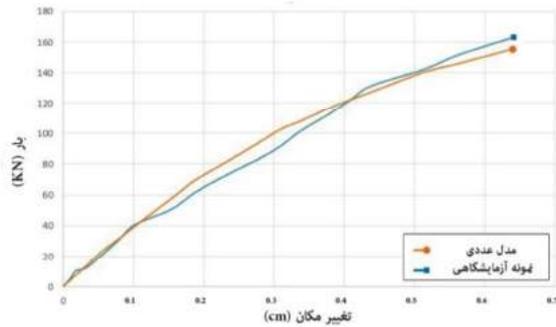
شکل ۵- مقایسه نمودارهای بار- تغییرمکان مدل عددی دال با بازشو با نمونه آزمایشگاهی Oukaili

در نمونه‌های S2 تا S8 متغیرهای تحلیل، طول، قطر، تعداد گل‌میخ و ضخامت صفحه فولادی می‌باشد. در نمونه‌های S9 و S10 نیز نحوه آرایش گل‌میخ‌ها تغییر کرده است که در شکل قابل مشاهده می‌باشد.

### ۲-۱- صحت‌سنجی مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی

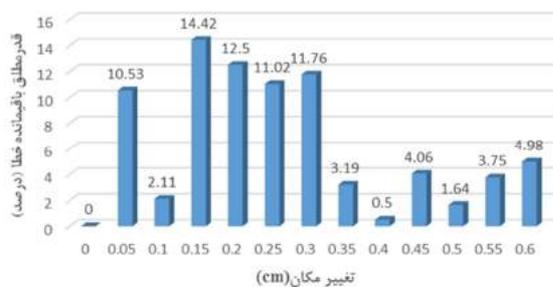
تحلیل نمونه‌ها تا رسیدن به بار شکست که لحظه رسیدن نمونه‌ها به کرنش پلاستیک نهایی بتن بود، ادامه یافت. کرنش پلاستیک نهایی بتن مطابق شکل ۲- (الف) به نرم‌افزار معرفی گردید. سپس جهت صحت‌سنجی، نمودار بار نهایی- تغییرمکان وسط دال شاهد در نرم‌افزار ترسیم شد و با نمودار حاصل از نمونه آزمایشگاهی مقایسه گردید. ابتدا جهت صحت‌سنجی دال با بازشو از نمونه آزمایشگاهی اوکایلی<sup>۱۰</sup> [۲۴] با دال مربعی به طول ضلع ۱۰۰۰ و ضخامت ۷۰ با بازشو ۱۵۰ میلی‌متری در بر

<sup>10</sup>- Oukaili



شکل ۸- مقایسه نمودارهای بار- تغییر مکان مدل عددی دال تقویت شده با صفحات فولادی خارجی با نمونه آزمایشگاهی Elbakry

مقادیر قدرمطلق باقیمانده خطا نسبت به تغییر مکان‌های مختلف مبتنی بر خروجی مدل عددی دال تقویت شده با صفحات فولادی خارجی و نمونه آزمایشگاهی Elbakry در شکل ۹ به نمایش در آمده است. همان‌طور که می‌توان دید، بیشترین درصد قدرمطلق باقیمانده خطا در تغییر مکان ۰/۱۵ سانتی‌متر به مقدار ۱۴/۴۲ درصد محاسبه شده است. همین‌طور میانگین درصد قدرمطلق باقیمانده خطا برابر با ۶/۱۹ درصد به دست خواهد آمد که نشان از صحت اعتبارسنجی مدل عددی دارد.



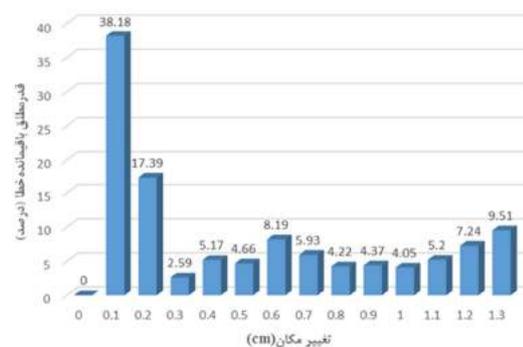
شکل ۹- مقادیر قدرمطلق باقیمانده خطا نسبت به تغییر مکان‌های مختلف مبتنی بر خروجی مدل عددی دال تقویت شده با صفحات فولادی خارجی و نمونه آزمایشگاهی Elbakry

### ۳- مقایسه تغییر شکل وسط نمونه‌های دال

#### ۳-۱- بررسی تأثیر تقویت با صفحه فولادی خارجی

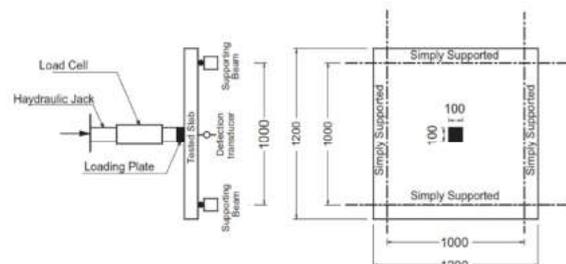
در این بخش نیز تحلیل نمونه‌ها تا رسیدن به بار شکست (لحظه رسیدن نمونه‌ها به کرنش پلاستیک نهایی

شکل ۶ مقادیر قدرمطلق باقیمانده خطا نسبت به تغییر مکان‌های مختلف مبتنی بر خروجی مدل عددی دال با بازشو و نمونه آزمایشگاهی Oukaili را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌توان دید بیشترین درصد قدرمطلق باقیمانده خطا در تغییر مکان ۰/۱ سانتی‌متر به مقدار ۳۸/۱۸ درصد رخ داده است؛ اما در کل با توجه به شکل ۶، شاهد میانگین درصد قدرمطلق باقیمانده خطایی برابر با ۸/۳۴ درصد هستیم که این خود نمایانگر دقت بالای فرآیند صحت‌سنجی است.



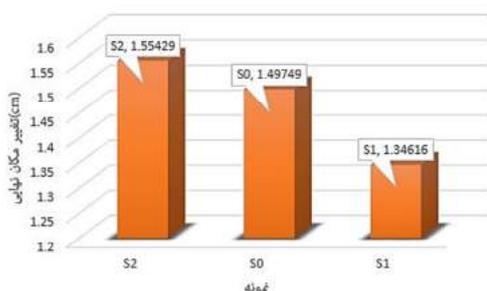
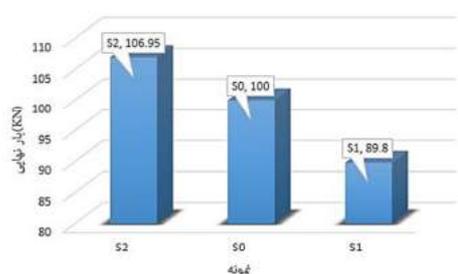
شکل ۶- مقادیر قدرمطلق باقیمانده خطا نسبت به تغییر مکان‌های مختلف مبتنی بر خروجی مدل عددی دال با بازشو و نمونه آزمایشگاهی Oukaili

همچنین برای صحت‌سنجی مدل‌سازی دال تقویت شده با صفحه فولادی خارجی از نمونه آزمایشگاهی Elbakry [۲۷] استفاده گردید (شکل ۷)، که مطابق شکل ۸ نمودار بار- تغییر مکان نمونه مدل‌سازی شده با نمونه آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت. در تغییر مکان یکسان، تفاوت میزان بار ثبت شده میان نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی قابل قبول می‌باشد.



شکل ۷- هندسه مدل آزمایشگاهی Elbakry [۲۷]

میزان بار نهایی نمونه S2 با بازشو و تقویت فولادی، ۱۹/۱٪ در مقایسه با بار نهایی نمونه S1 با همان بازشو ولی بدون تقویت، و به میزان ۶/۹۵٪ نسبت به نمونه بدون بازشو و تقویت افزایش داشته است. به عبارت دیگر، در صورت استفاده از تقویت فولادی مناسب در دال‌های با بازشو می‌توان کاهش مقاومت ناشی از وجود بازشو را به خوبی جبران نمود و حتی به بار نهایی بیشتر از دال بدون بازشو دست پیدا کرد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است میزان تغییرمکان نهایی نمونه S2 بیشتر از دو نمونه شاهد دیگر می‌باشد.

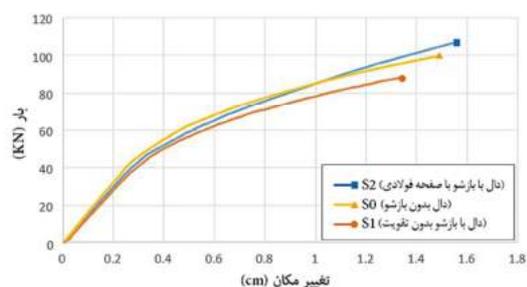


شکل ۱۱- تأثیر تقویت با صفحه فولادی بر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌ها

### ۲-۳- بررسی تأثیر ابعاد گل‌میخ

جهت بررسی تأثیر ابعاد گل‌میخ در رفتار نمونه‌ها، از دال‌های تقویت‌شده با صفحه فولادی به ابعاد  $150 \times 150 \times 4$  میلی‌متر به همراه ۱۶ عدد گل‌میخ استفاده شد و فقط طول و قطر گل‌میخ تغییر کرد. بنابراین نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های S3 (با گل‌میخ به قطر ۶ و طول ۵۰ میلی‌متر) و نمونه S4 (با گل‌میخ به قطر ۱۰ و طول ۴۰ میلی‌متر) ترسیم شد و با نمونه S2 (با گل‌میخ به قطر ۶ و طول ۴۰ میلی‌متر) مقایسه گردید.

(بتن) ادامه یافت. برای بررسی تأثیر تقویت با صفحه فولادی خارجی در رفتار نمونه‌ها، ابتدا نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های S2 (دال با بازشو مربعی با طول ضلع ۱۵۰ میلی‌متر تقویت‌شده با صفحه فولادی)، S1 (دال با بازشو مربعی با طول ضلع ۱۵۰ میلی‌متر بدون تقویت) ترسیم شد و با نمونه شاهد S0 (بدون بازشو) مقایسه گردید. تأثیر تقویت با صفحه فولادی خارجی بر رفتار منحنی بار- تغییرمکان نمونه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تأثیر تقویت با صفحه فولادی بر رفتار منحنی بار- تغییرمکان نمونه‌ها

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که بازشو سبب ایجاد تغییرشکل بزرگ‌تری در سطح بار یکسان می‌شود. از طرف دیگر استفاده از صفحه فولادی به ابعاد  $150 \times 150 \times 4$  میلی‌متر به همراه ۱۶ عدد گل‌میخ با قطر ۶ و طول ۴۰ میلی‌متر جهت اتصال بین صفحه فولادی و دال بتنی، باعث کاهش تغییرشکل به ازای بار یکسان شده است. به‌طور مثال در سطح بار یکسان ۷۰ کیلونیوتن میزان تغییرمکان ثبت‌شده برای نمونه بدون بازشو S0، ۰/۶۴ سانتیمتر، نمونه S2، ۰/۶۹ سانتیمتر و نمونه S1، ۰/۷۹ سانتیمتر می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش میزان تغییرشکل مرکز دال در صورت استفاده از صفحه فولادی به‌عنوان تقویت می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نمودار بار- تغییرمکان حاصل از دال با بازشو تقویت‌شده توسط صفحه فولادی بسیار نزدیک به دال بدون بازشو می‌باشد.

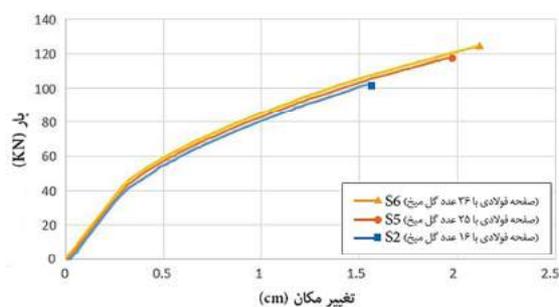
باتوجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، وجود صفحه فولادی بر بارهای نهایی دال تخت بتنی تأثیر می‌گذارد.

نمونه S2 با گل‌میخ به قطر ۶ و طول ۴۰ میلی‌متر، افزایش داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورت افزایش قطر گل‌میخ میزان بار نهایی دال، افزایش قابل توجهی خواهد یافت. همچنین در صورت استفاده از گل‌میخ با ابعاد بزرگ‌تر، تغییر مکان نهایی نمونه‌ها بیشتر از نمونه شاهد گردیده است.

### ۳-۳- بررسی تأثیر تعداد گل‌میخ

در این مرحله جهت مطالعه و بررسی تأثیر تعداد گل‌میخ بر رفتار نمونه‌ها، از دال‌های تقویت‌شده با صفحه فولادی به ابعاد  $150 \times 150 \times 4$  میلی‌متر با ابعاد یکسان گل‌میخ (قطر ۶ و طول ۴۰ میلی‌متر) استفاده گردید. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های S6 (با ۳۶ عدد گل‌میخ) و S5 (با ۲۵ عدد گل‌میخ) ترسیم شد و با نمونه مرجع S2 مقایسه گردید.

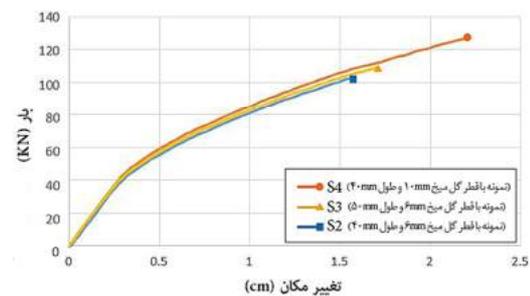
شکل ۱۴ تأثیر تعداد گل‌میخ بر رفتار منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها را نشان می‌دهد که در آن رفتار نمونه‌ها با تعداد متفاوت گل‌میخ‌ها با ابعاد یکسان، با یکدیگر مقایسه گردیده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تغییر شکل‌های ثبت‌شده در این حالت نیز در سطح بار یکسان برای نمونه‌های مختلف بسیار نزدیک به هم می‌باشد، ولی تفاوت اصلی ایجاد شده در تغییر شکل و بار نهایی حاصل از آن‌ها می‌باشد.



شکل ۱۴- تأثیر تعداد گل‌میخ‌ها بر رفتار منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها

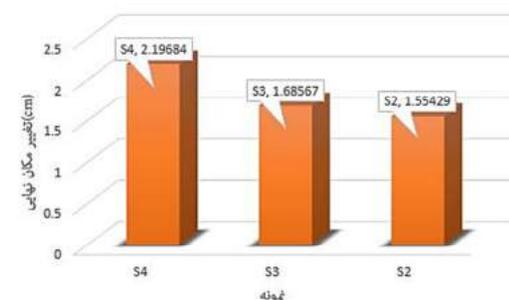
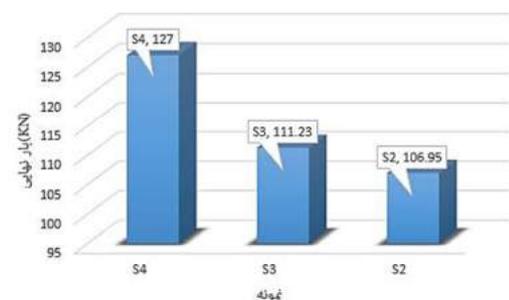
با توجه به شکل ۱۵، تعداد گل‌میخ‌ها بر بارهای نهایی دال تخت بتنی تأثیر می‌گذارد. میزان بار نهایی نمونه S6 با ۳۶ عدد گل‌میخ،  $16/30\%$  و نمونه S5 با ۲۵

شکل ۱۲ تأثیر ابعاد گل‌میخ بر رفتار منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها را نشان می‌دهد که در آن رفتار نمونه‌ها با ابعاد متفاوت گل‌میخ‌ها، با یکدیگر مقایسه گردید. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تغییر شکل‌های ثبت‌شده در سطح بار یکسان برای نمونه‌های مختلف بسیار نزدیک به هم می‌باشد، ولی تغییر شکل و بار نهایی حاصل از آن‌ها با یکدیگر متفاوت است.



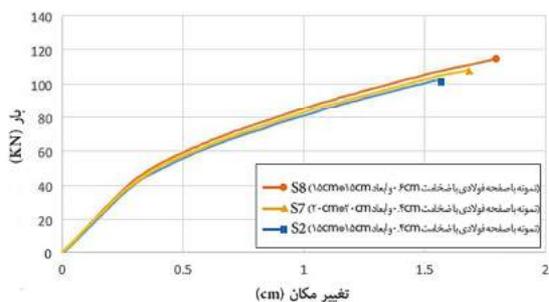
شکل ۱۲- تأثیر ابعاد گل‌میخ بر رفتار منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها

بر اساس شکل ۱۳، ابعاد گل‌میخ‌ها بر بارهای نهایی دال تخت بتنی تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۳- تأثیر ابعاد گل‌میخ بر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌ها  
میزان بار نهایی نمونه S4 با گل‌میخ به قطر ۱۰ و طول ۴۰ میلی‌متر،  $18/75\%$  و نمونه S3 با گل‌میخ به قطر ۶ و طول ۵۰ میلی‌متر،  $4/28\%$  در مقایسه با بار نهایی

یکسان برای نمونه‌های مختلف و همچنین بار و تغییرشکل نهایی آن‌ها نزدیک به هم می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش ضخامت ورق فولادی تا ۶ میلی‌متر برای نمونه S8 و افزایش ابعاد آن تا ۵ سانتیمتر برای نمونه S7 تأثیر چندانی نسبت به نمونه S2، بر روی بار نهایی شکست، نمی‌گذارد. این به این معناست که صفحات فولادی به تنهایی سبب توسعه تقویت دال نمی‌شود.



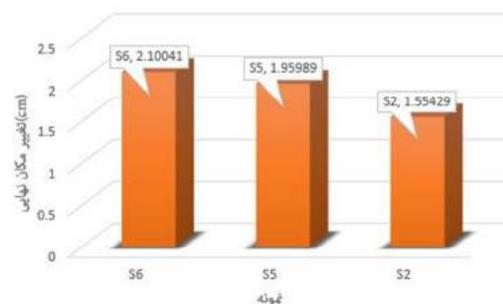
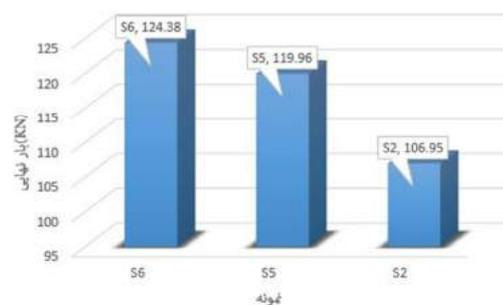
شکل ۱۶- تأثیر موقعیت ابعاد و ضخامت صفحه فولادی بر رفتار منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، تأثیر تغییر ابعاد صفحه فولادی بر بارهای نهایی دال تخت بتنی کمتر از تأثیر تغییرات گل‌میخ‌ها می‌باشد. میزان بار نهایی نمونه S8 با ابعاد  $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۶$  میلی‌متر،  $۶/۹۳\%$  و نمونه S7 با ابعاد  $۲۰۰ \times ۲۰۰ \times ۴$  میلی‌متر،  $۳/۷۹\%$  در مقایسه با بار نهایی نمونه S2 با ابعاد  $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۴$  میلی‌متر افزایش داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر ابعاد صفحه فولادی تأثیر کمی بر بارهای نهایی دال دارد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است میزان تغییر مکان نهایی نمونه S8 و S7 اندکی بیشتر از نمونه شاهد S2 می‌باشد.

### ۳-۵- بررسی تأثیر آرایش گل‌میخ‌ها

در مرحله آخر برای بررسی تأثیر آرایش متفاوت گل‌میخ‌ها در رفتار نمونه‌ها، صفحه‌های فولادی با آرایش مختلف گل‌میخ‌ها مدل‌سازی گردید. به این منظور، نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های S2 (صفحه فولادی با تعداد و ابعاد یکسان گل‌میخ ولی با آرایش مربعی نوع ۱ از گل‌میخ‌ها)، S9 (صفحه فولادی با تعداد و ابعاد یکسان

عدد گل‌میخ،  $۱۶/۱۲\%$  در مقایسه با بار نهایی نمونه S2 با ۱۶ عدد گل‌میخ، افزایش داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورت افزایش تعداد گل‌میخ، افزایش قابل توجهی بر ظرفیت باربری دال ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش تعداد گل‌میخ، تغییر مکان نهایی نمونه‌ها، نسبت به نمونه S2 افزایش یافته است.



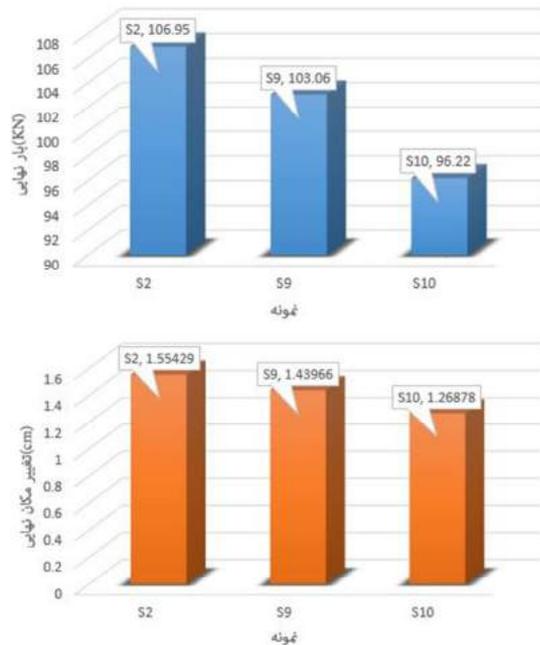
شکل ۱۵- تأثیر تعداد گل‌میخ‌ها بر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌ها

### ۳-۴- بررسی تأثیر ابعاد و ضخامت صفحه فولادی

در این مرحله نیز برای بررسی تأثیر ابعاد صفحه فولادی، از دال‌های تقویت شده با صفحه فولادی با ابعاد و تعداد یکسان گل‌میخ (۱۶ عدد گل‌میخ به قطر ۶ و طول ۴۰ میلی‌متر) استفاده شد. ابتدا نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های S8 (با صفحه فولادی به ابعاد  $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۶$  میلی‌متر) و S7 (با صفحه فولادی به ابعاد  $۲۰۰ \times ۲۰۰ \times ۴$  میلی‌متر) ترسیم شد و با نمونه S2 (با صفحه فولادی به ابعاد  $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۴$  میلی‌متر) مقایسه گردید.

شکل ۱۶ تأثیر ابعاد صفحه فولادی بر رفتار منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها را نشان می‌دهد که در آن رفتار نمونه‌ها با ابعاد متفاوت صفحه تقویتی، با یکدیگر مقایسه گردیده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تغییرشکل‌های ثبت شده در این حالت نیز در سطح بار

همان‌طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، نحوه قرارگیری گل‌میخ‌ها نیز تأثیر اندکی بر تغییرمکان نهایی نمونه‌ها می‌گذارد.



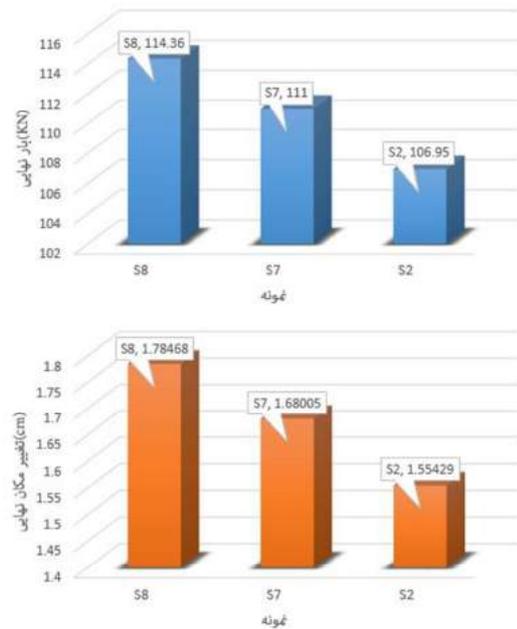
شکل ۱۹- تأثیر آرایش گل‌میخ‌ها بر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌ها

میزان بار نهایی نمونه S9 با آرایش مربعی نوع ۲ از گل‌میخ‌ها، ۳/۷۷٪ و نمونه S10 با آرایش دایره‌ای گل‌میخ‌ها، ۱۱/۱۵٪ در مقایسه با بار نهایی نمونه S2 با آرایش مربعی نوع ۱ از گل‌میخ‌ها، کاهش داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر نحوه قرارگیری گل‌میخ‌ها نیز می‌تواند بر بارهای نهایی دال اثر بگذارد. با توجه به شکل، کاهش تغییرمکان نهایی نمونه‌های S9 و S10 با آرایش متفاوت گل‌میخ، نسبت به نمونه شاهد S2 را شاهد هستیم.

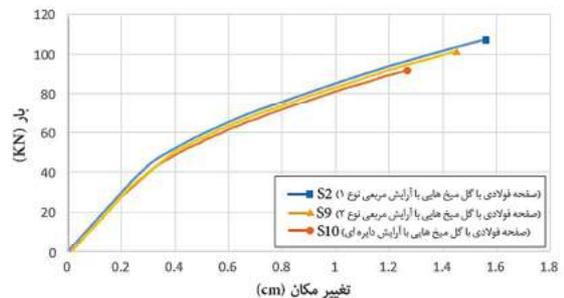
#### ۴- الگوی ترک‌خوردگی و کانتور تغییرشکل نمونه‌ها

الگوی ترک نمونه‌ها در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود. الگوی ترک از سطح زیرین دال گرفته شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ترک در سطح زیرین دال‌ها از ناحیه بارگذاری مرکزی (زیرستون)

گل‌میخ ولی با آرایش مربعی نوع ۲ از گل‌میخ‌ها) و نمونه S10 (صفحه فولادی با تعداد و ابعاد یکسان گل‌میخ ولی با آرایش دایره‌ای گل‌میخ‌ها) مقایسه گردید که در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- تأثیر موقعیت ابعاد و ضخامت صفحه فولادی بر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌ها

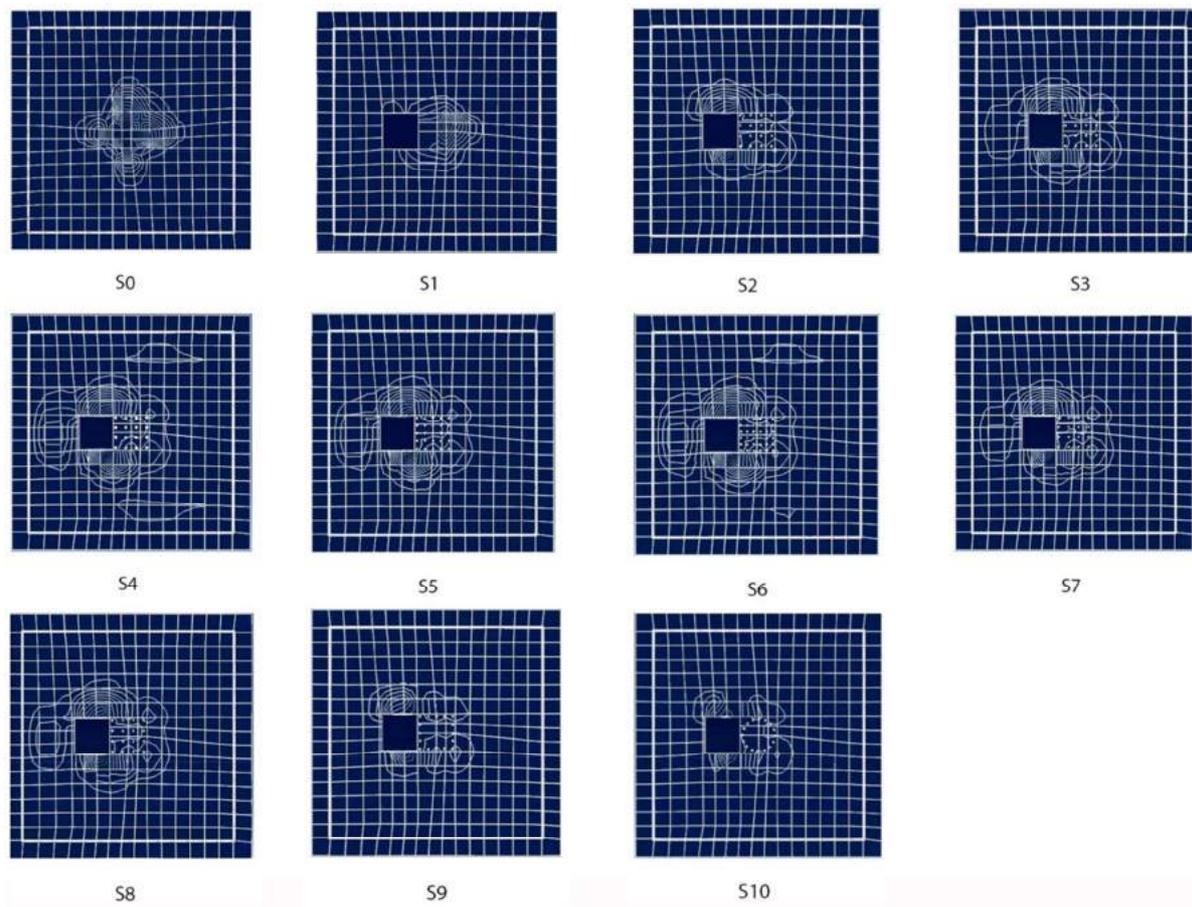


شکل ۱۸- تأثیر آرایش گل‌میخ‌ها بر رفتار منحنی بار-تغییرمکان نمونه‌ها

شکل ۱۸، تأثیر نحوه قرارگیری گل‌میخ بر رفتار منحنی بار-تغییرمکان نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تغییرشکل‌های ثبت‌شده در این حالت نیز در سطح بار یکسان برای نمونه‌های مختلف بسیار نزدیک به هم می‌باشد ولی تفاوت اصلی ایجادشده در بار نهایی حاصل از آن‌ها می‌باشد.

شکست نیز در این نمونه‌ها بیشتر گردیده است. همچنین ملاحظه گردید که در نمونه‌های با تعداد گل‌میخ بالاتر، گسترش ترک بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. از طرفی، در نمونه‌های S9 و S10 با آرایش متفاوت گل‌میخ، گسترش ترک کمتر است و ترک همانند نمونه بدون تقویت S1 در ناحیه بارگذاری، متمرکز گردیده است.

به صورت شعاعی شروع شده و گسترش می‌یابد. وجود بازشو در دال بر الگوی ترک ایجاد شده تأثیر می‌گذارد و مشاهده می‌شود که در اکثر نمونه‌ها اولین ترک در نزدیک‌ترین گوشه از بازشو نسبت به ستون آغاز شده و به لبه‌های دال گسترش پیدا می‌کند. در نمونه‌های تقویت‌شده با صفحه فولادی و گل‌میخ مشاهده گردید که الگوی ترک بیشتر به لبه‌های دال گسترش یافته که بار



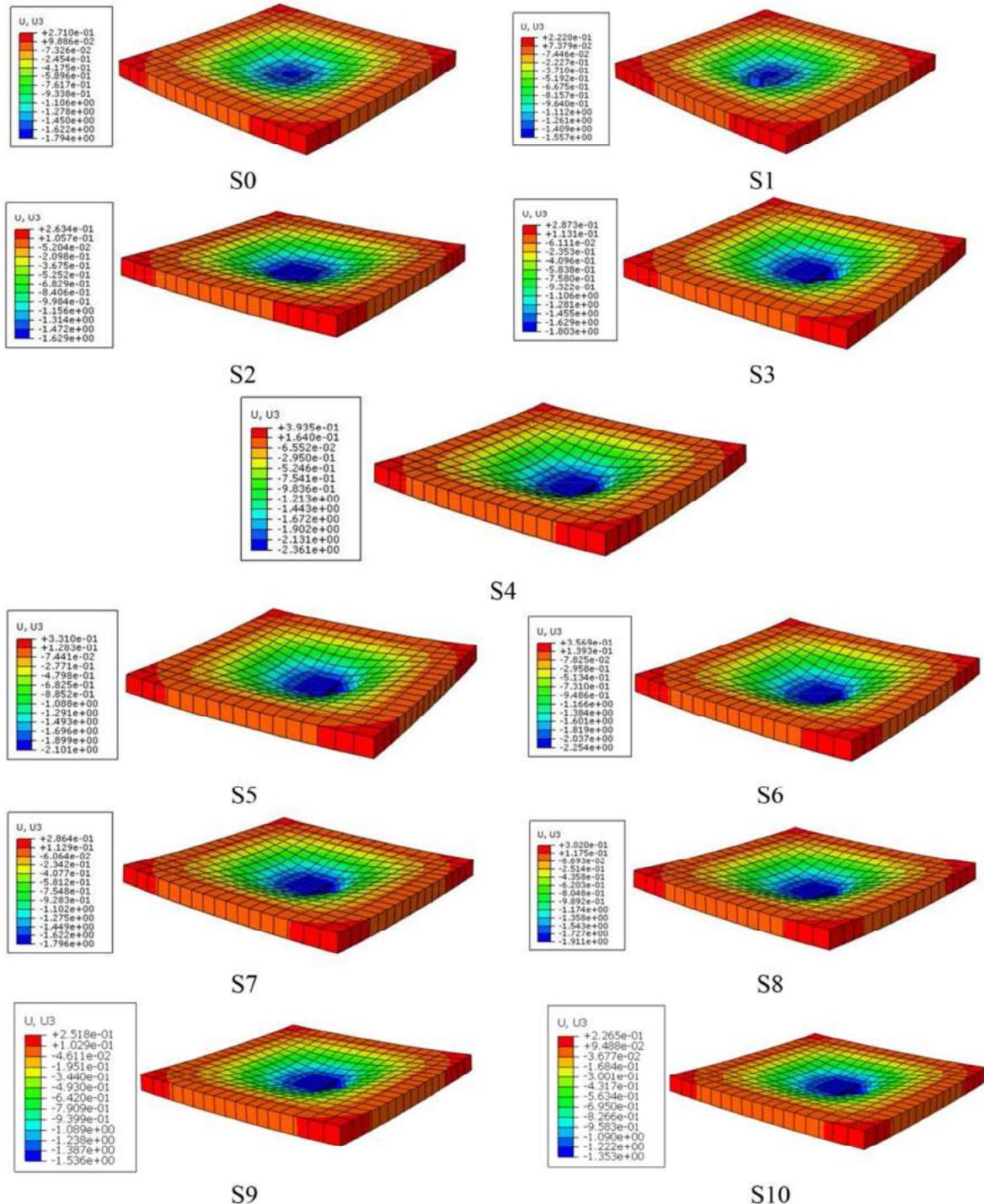
شکل ۲۰- الگوی ترک خوردگی نمونه‌ها

ظرفیت اتلاف انرژی و تنش S33 در مرکز دال‌ها تحت بار ثابت ۵۰ کیلونیوتن (جهت بررسی تنش نمونه‌ها در شرایط یکسان) نیز نشان داده شده است. یک عضو بتن مسلح، انرژی وارده را با رفتار غیرارتجاعی خود در هنگام بارگذاری از بین می‌برد که به آن ظرفیت اتلاف انرژی می‌گویند. از آنجاکه عضو بتن مسلح از آرماتور فولادی و بتن تشکیل شده است، ظرفیت اتلاف انرژی آن برابر است با مجموع ظرفیت اتلاف انرژی بتن و آرماتور

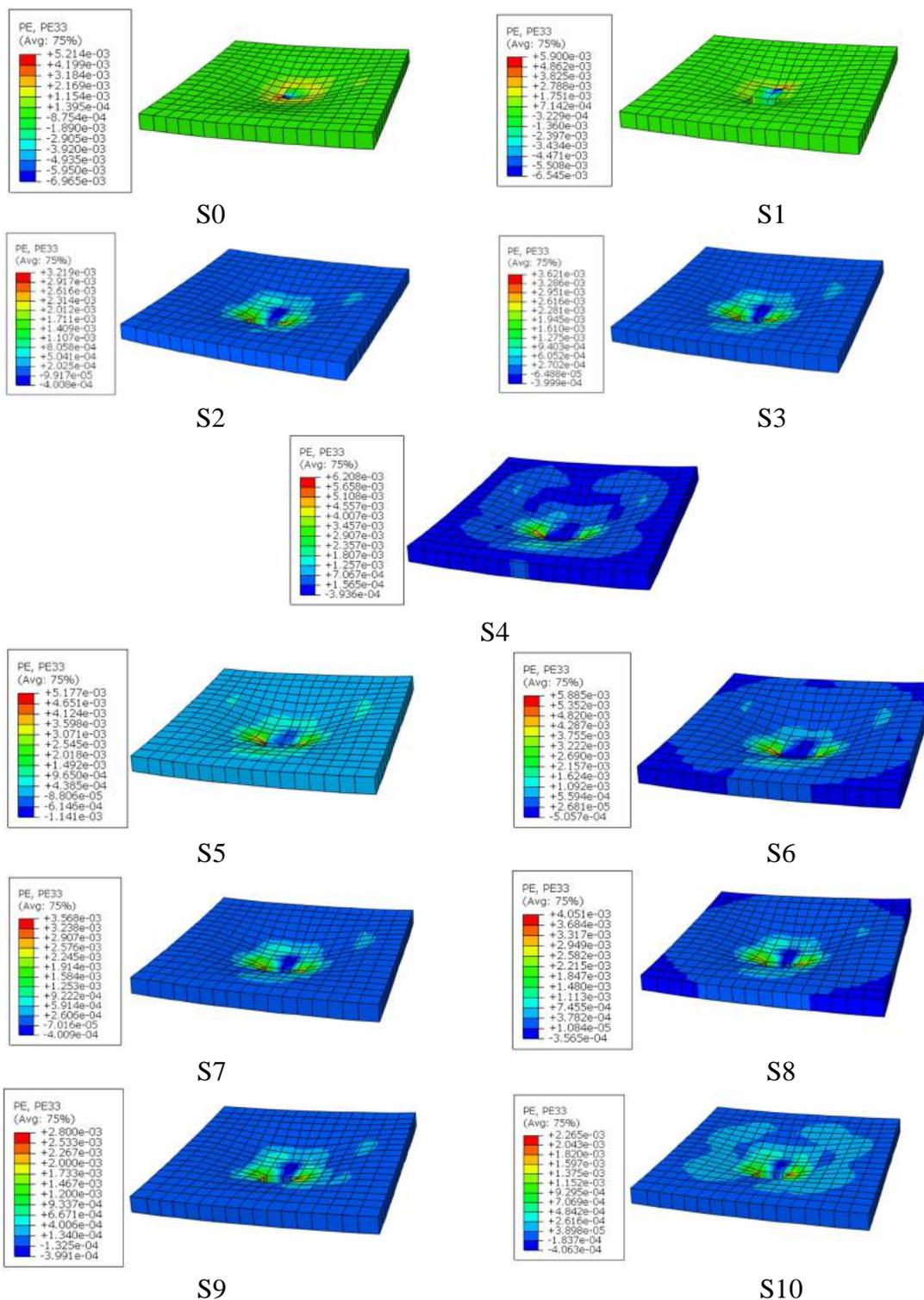
کانتور تغییرشکل مرکز دال در راستای محور Z در شکل ۲۱ و کانتور کرنش نمونه‌ها در شکل ۲۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است حداکثر تغییرمکان ایجاد شده با توجه به وقوع برش پانچ، در مرکز دال رخ داده است. در جدول ۴، بار نهایی تمامی نمونه‌های مدل‌سازی شده و درصد تغییرات بار نهایی نمونه‌های مختلف نسبت به دال S2 دارای بازشو و تقویت‌شده با صفحه فولادی آورده شده است. همچنین

همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، در صورت استفاده از صفحه فولادی و افزایش قطر، طول و تعداد گل‌میخ، ظرفیت اتلاف انرژی افزایش و تنش تحت مربعی نوع ۱ و دایره‌ای، ظرفیت اتلاف انرژی کاهش و تنش تحت بار یکسان افزایش یافته است.

فولادی. با این حال، لازم به ذکر است که برای یک عضو تحت فشار محوری، بتن انرژی قابل‌توجهی را جذب می‌کند، زیرا حجم زیادی از بتن به مقاومت در برابر بار محوری کمک می‌کند [۲۹]. هرچه ظرفیت اتلاف انرژی عضو بیشتر گردد میزان بار نهایی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۲۱- کانتور تغییرشکل مرکز دال در راستای محور Z



شکل ۲۲- کانتور کرنش نمونه‌ها

### ۵- پیش‌بینی ظرفیت پانچ با روش سطح پاسخ (RSM)

روش سطح پاسخ ( $RSM^{11}$ ) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها می‌باشد [۳۰]. روش سطح پاسخ یک

<sup>11</sup>- Response Surface Methodology

مشکل از استراتژی‌های علمی برای کاوش در فضای فرآیند یا متغیرهای مستقل، مدل‌سازی آماری- تجربی به‌منظور توسعه یک رابطه مناسب میان متغیرهای ورودی و خروجی و بهینه‌سازی روش‌ها برای یافتن مقدار متغیرهای فرآیند که مقادیر مطلوب پاسخ را منجر می‌شود، است.

روش مبتنی بر رگرسیون برای برقراری ارتباط بین چندین متغیر ورودی به‌طور بالقوه و یک پارامتر خروجی است. در اصطلاح به این پارامتر، خروجی پاسخ گفته می‌شود. متغیرهای ورودی در اغلب اوقات به‌عنوان متغیرهای مستقل شناخته می‌شوند و در عمل وابسته به کنترل محققان و مهندسان می‌باشند. روش سطح پاسخ

جدول ۴- نتایج نهایی نمونه‌های مدل‌سازی شده

نمونه	ابعاد بازشو (mm)	بار نهایی (kN)	تفاوت بار نهایی نمونه و بار نهایی دال S2	درصد تغییرات بار نهایی نمونه نسبت به دال S2	تنش در مرکز دال S33 تحت بار ۵۰ کیلونیوتن	ظرفیت اتلاف انرژی (kN)
S0	-	۱۰۰/۰۰	-۶/۹۵	-۶/۵۰	-۳۱/۲۶	۹۱۰/۰۸
S1	۱۵۰×۱۵۰	۸۹/۸۰	-۱۷/۱۵	-۱۶/۰۴	-۳۲/۶۵	۷۹۰/۲۸
S2	۱۵۰×۱۵۰	۱۰۶/۹۵	۰	۰	-۲۸/۰۲	۱۰۷۲/۸۴
S3	۱۵۰×۱۵۰	۱۱۱/۲۳	۴/۲۸	۴/۰۰	-۲۷/۲۸	۱۲۰۴/۰۳
S4	۱۵۰×۱۵۰	۱۲۷/۰۰	۲۰/۰۵	۱۸/۷۵	-۲۳/۴۳	۱۸۴۰/۰۶
S5	۱۵۰×۱۵۰	۱۱۹/۹۶	۱۳/۰۱	۱۲/۱۷	-۲۱/۷۳	۱۵۲۷/۷۱
S6	۱۵۰×۱۵۰	۱۲۴/۳۸	۱۷/۴۳	۱۶/۳۰	-۲۱/۲۱	۱۷۲۹/۵۹
S7	۱۵۰×۱۵۰	۱۱۱/۰۰	۴/۰۵	۳/۷۹	-۲۹/۴۲	۱۱۹۰/۳۰
S8	۱۵۰×۱۵۰	۱۱۴/۳۶	۷/۴۱	۶/۹۳	-۳۰/۲۵	۱۳۵۱/۱۸
S9	۱۵۰×۱۵۰	۱۰۳/۰۶	-۳/۸۹	-۳/۶۴	-۳۴/۴۵	۹۴۰/۴۰
S10	۱۵۰×۱۵۰	۹۶/۲۲	-۱۰/۷۳	-۱۰/۰۳	-۳۶/۰۴	۷۶۴/۱۹

که اغلب به جهت داشتن یک توزیع احتمال نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  فرض می‌شود. بنابراین داریم:

$$E(y) = \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (2)$$

متغیرهای  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  در رابطه (۲) معمولاً متغیرهای طبیعی نامیده می‌شوند، زیرا با واحدهای اندازه‌گیری طبیعی مانند درجه سانتی‌گراد یا کیلوگرم بر مترمکعب بیان شده‌اند.  $\eta$  نیز معرف تابع پاسخ می‌باشد. با مدل سطح پاسخ، به راحتی می‌توان متغیرهای طبیعی را به متغیرهای کد شده  $x_1, x_2, \dots, x_k$  که معمولاً به صورت بی‌بعد، با میانگین صفر و همان واریانس تعریف می‌شوند، تبدیل نمود. با در نظر گرفتن متغیرهای کد شده، تابع پاسخ رابطه (۲) به صورت زیر نوشته خواهد شد:

در این تحقیق، بیشتر بر کاربرد دوم روش سطح پاسخ یعنی مدل‌سازی آماری به‌منظور توسعه یک رابطه تقریب مناسب میان پاسخ  $Y$  و متغیرهای مستقل  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  تمرکز شده است. رابطه کلی به صورت زیر است:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن شکل تابع پاسخ دقیق  $f$  ناشناخته است و ممکن است پیچیده باشد و  $\varepsilon$  نشان‌دهنده خطای مدل‌سازی می‌باشد که در تابع  $f$  به حساب نیامده است.  $\varepsilon$  معمولاً شامل اثرات خطای اندازه‌گیری بر پاسخ و همچنین تأثیر خطای ناشی از عوامل پارامترهای ورودی ناشناخته در مدل‌سازی است.  $\varepsilon$  همانند یک خطای آماری رفتار کرده

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (۶)$$

این مدل می‌تواند به‌عنوان یک تقریب از سطح پاسخ صحیح در یک منطقه نسبتاً کوچک، مفید واقع شود. دلایل استفاده از مدل مرتبه دوم موارد زیر است:

۱- مدل مرتبه دوم بسیار انعطاف‌پذیر است و

می‌تواند طیف گسترده‌ای از توابع را در برگیرد.

به همین منظور، اغلب به‌عنوان یک تقریب سطح

پاسخ صحیح، به‌خوبی عمل خواهد کرد.

۲- محاسبه پارامترهای  $\beta$  به‌راحتی انجام خواهد

پذیرفت و برای این منظور می‌توان از روش حداقل

مربعات استفاده نمود.

۳- تجارب عملی نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل

مرتبه دوم در حل مسائل واقعی سطح پاسخ است.

در حالت کلی می‌توان مدل مرتبه اول را به‌صورت

زیر نوشت:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (۷)$$

و مدل مرتبه دوم نیز به شکل زیر خواهد بود:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (۸)$$

در این تحقیق، به‌منظور ساخت مدل RSM از

نسخه ۱۰ نرم‌افزار Design Expert استفاده شده است.

این نرم‌افزار امکان برازش، تحلیل و مقایسه توابع مختلف

اعم از خطی، برهم‌کنش (2FI) و چندجمله‌ای را فراهم

می‌آورد. همچنین صحت مدل<sup>۱۲</sup> با استفاده از آزمون فیشر

سنجیده شد و دقت عملکرد مدل به‌وسیله ضریب

رگرسیون ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌علاوه، تأثیر

متغیرهای ورودی بر روی برش پانچ با استفاده از تحلیل

واریانس ( $ANOVA^{13}$ ) بررسی شد.

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (۳)$$

به دلیل ناشناخته بودن شکل تابع پاسخ  $f$ ، باید آن

را تقریب زد. در حقیقت، استفاده موفق از سطح پاسخ به

توانایی محقق برای توسعه یک تقریب مناسب برای  $f$

بستگی دارد. معمولاً، یک تابع چندجمله‌ای مرتبه پایین

در منطقه نسبتاً کوچکی از فضای متغیر مستقل مناسب

است. در بسیاری موارد، از یک مدل چندجمله‌ای مرتبه

اول یا مرتبه دوم استفاده می‌شود. مدل‌های مرتبه اول

زمانی مناسب‌اند که محقق علاقه‌مند باشد تا سطح پاسخ

صحیح را در بیش از یک منطقه نسبتاً کوچک از فضای

متغیر مستقل و محلی که در آن انحنای کمی در  $f$  وجود

دارد، تخمین بزند. در صورت وجود دو متغیر مستقل،

مدل مرتبه اول با توجه به متغیرهای کد شده به‌صورت

زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (۴)$$

در این رابطه مقادیر  $\beta_i$  همان ضرایب معادله می‌باشد.

شکل مدل مرتبه اول در معادله (۴) گاهی اوقات تحت

عنوان مدل تأثیرات اصلی نامیده می‌شود، زیرا فقط اثرات

اصلی دو متغیر فرضی  $x_1$  و  $x_2$  را شامل می‌شود. در

صورت وجود یک برهم‌کنش بین این متغیرها، می‌توان آن

را بسادگی به مدل افزود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (۵)$$

افزودن جزء برهم‌کنش، معرف انحنای تابع پاسخ

خواهد بود. اغلب انحنا در سطح پاسخ صحیح به اندازه‌ای

است که مدل مرتبه اول (حتی با وجود جزء برهم‌کنش)

برای تقریب آن دارای کارایی لازم نمی‌باشد. در این

شرایط به مدل مرتبه دوم نیاز خواهد بود. در حالت وجود

دو متغیر مستقل، مدل مرتبه دوم به‌صورت زیر خواهد

بود:

<sup>12</sup>- Significant of the model

<sup>13</sup>- Analysis of variance

N تعداد گل میخ، L طول گل میخ، D قطر گل میخ، T ضخامت صفحه فولادی و W ابعاد صفحه فولادی است.

داده‌های استفاده شده به منظور مدل سازی به صورت جدول ۵، مرتب شدند. در این جدول، P معرف برش پانچ،

جدول ۵- داده‌های استفاده شده به منظور مدل سازی

W	T	D	L	N	P
۱۵۰	۴	۶	۴۰	۱۶	۱۰۶/۹۵
۱۵۰	۴	۸	۴۰	۱۶	۱۱۸/۸۵
۱۵۰	۴	۶	۵۰	۱۶	۱۱۱/۲۳
۱۵۰	۴	۶	۶۰	۱۶	۱۱۳/۵۸
۱۵۰	۴	۱۰	۴۰	۱۶	۱۲۷
۱۵۰	۴	۶	۴۰	۲۵	۱۱۹/۹۶
۱۵۰	۴	۶	۴۰	۳۶	۱۲۴/۳۸
۲۰۰	۴	۶	۴۰	۱۶	۱۱۱
۱۷۵	۴	۶	۴۰	۱۶	۱۰۸/۱۲
۱۵۰	۲	۶	۴۰	۱۶	۹۴/۳۵
۱۵۰	۶	۶	۴۰	۱۶	۱۱۴/۳۶

ضرایب هریک از متغیرها نشان دهنده میزان اثرگذاری آن‌ها بر برش پانچ است.

$$R1 = +9.93926 + 0.086828 \times W + 5.00250 \times T + 5.35835 \times D + 0.38247 \times L + 0.99999 \times N \quad (9)$$

عملکرد مدل ساخته شده به روش سطح پاسخ در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود، مدل سطح پاسخ قادر به پیش بینی دقیق مقاومت فشاری است.

#### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، از مدل اجزای محدود جهت بررسی رفتار برشی پانچ، در دال‌های بتن مسلح استفاده شده است. به همین منظور از ۱۱ نمونه دال بتن مسلح کمک گرفته شده است که در آن ۲ دال بتنی بدون تقویت جهت کنترل و ۹ دال تقویت شده با صفحات فولادی که مجهز به گل میخ هستند، قرار دارند. پارامترهای در نظر گرفته شده در این آزمایش شامل اندازه و ضخامت ورق، طول، قطر، نحوه قرارگیری و تعداد گل میخ می باشند که با استفاده از روش اجزای محدود، تحلیل و پس از حصول

در این تحقیق، از تابع خطی به منظور توسعه مدل سطح پاسخ برای پیش بینی برش پانچ استفاده شد و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردید. این مدل علاوه بر مقدار P کم (۰/۰۰۲۵)، ضریب رگرسیون ۰/۹۵۲۹ را نتیجه داده است (جدول ۶). منظور از درجه آزادی رگرسیون و خطا ( $DF^{14}$ ) در هر مدل به ترتیب نشان دهنده تعداد متغیرهای پذیرفته شده و کنار گذاشته شده به علت تأثیر کم آنان در فرآیند پیش بینی از مدل کلی ساخته شده است.

نتایج تحلیل واریانس نیز در جدول ۷ به نمایش در آمده است. با توجه به مقادیر F می توان نتیجه گرفت که قطر گل میخ بیشترین تأثیر را بر برش پانچ دارد. پس از قطر گل میخ، به ترتیب ضخامت صفحه فولادی، تعداد گل میخ، طول گل میخ و اندازه صفحه فولادی بر برش پانچ اثرگذار هستند.

مدل ساخته شده با روش سطح پاسخ برای پیش بینی برش پانچ به صورت رابطه ۹ به دست آمد.

<sup>14</sup>-Degree of Freedom

اطمینان از تطابق نتایج آزمایشگاهی و نمونه‌های تحلیلی

نتایج زیر قابل استنتاج است:

۱. وجود بازشو باعث کاهش بار نهایی و ظرفیت

برشی پانچ دال می‌گردد. در صورت استفاده از

تقویت فولادی مناسب در دال‌های با بازشو

می‌توان کاهش مقاومت ناشی از وجود بازشو را

به‌خوبی جبران نمود و حتی به بار نهایی بیشتر از

دال بدون بازشو دست پیدا کرد.

جدول ۶- تحلیل آماری مدل RSM

۰/۹۵۲۹	R <sup>2</sup>
۰/۹۰۵۷	R <sup>2</sup> تعدیل‌یافته (Adj R-Squared)
۱۵/۲۹۴	کفایت دقت (Adeq Precision)
۲/۷۸	انحراف معیار
۲/۴۵	ضریب تغییر (C.V. %)

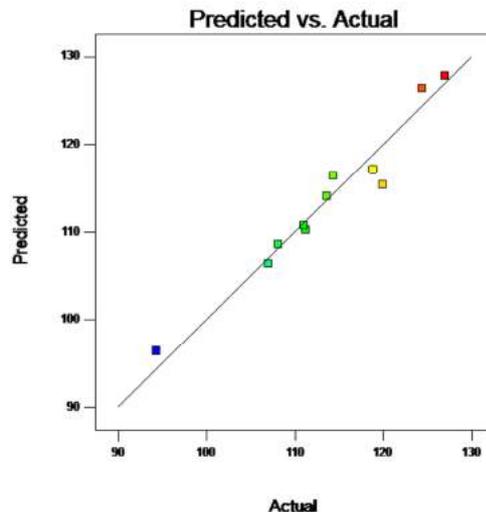
جدول ۷- تحلیل واریانس

متغیر	نماد	مجموع مربعات	F	P Prob > F
اندازه صفحه فولادی	W	۱۶/۰۶	۲/۰۷	۰/۲۰۹۵
ضخامت صفحه فولادی	T	۲۰۰/۲۰	۲۵/۸۴	۰/۰۰۳۸
قطر گل‌میخ	D	۳۹۱/۳۵	۵۰/۵۲	۰/۰۰۰۹
طول گل‌میخ	L	۴۹/۸۵	۶/۴۳	۰/۰۵۲۱
تعداد گل‌میخ	N	۳۳۰/۸۲	۴۲/۷۰	۰/۰۰۱۳

۳. افزایش ضخامت ورق فولادی تا ۶ میلی‌متر برای نمونه S8، و افزایش ابعاد آن تا ۵ سانتیمتر برای نمونه S7 تأثیر چندانی نسبت به نمونه S2، بر روی بار نهایی شکست، نمی‌گذارد. این بدین معناست که صفحات فولادی به‌تنهایی سبب توسعه تقویت دال نمی‌شود.

۴. کارایی تکنیک مورد استفاده برای اتصال صفحه فولادی به دال مسلح بتنی، بیشتر از تأثیر ضخامت صفحات فولادی، جهت افزایش ظرفیت برش پانچ بوده است. استفاده از قطر بزرگ‌تر و یا تعداد بیشتر از گل‌میخ‌ها به مراتب نتایج بهتری از افزایش ظرفیت برش پانچ، نسبت به استفاده از صفحه فولادی ضخیم‌تر داشته است.

۵. نحوه قرارگیری گل‌میخ‌ها نیز تأثیر اندکی بر بار نهایی و تغییر مکان نهایی نمونه‌ها می‌گذارد. قرارگیری گل‌میخ‌ها با آرایش مربعی بار نهایی



شکل ۲۳- عملکرد مدل ساخته‌شده به‌وسیله روش سطح

پاسخ (RSM)

۲. تقویت دال بتنی مسلح در معرض برش پانچ با

استفاده از صفحات فولادی مجهز به گل‌میخ،

افزایش ۲۰ الی ۴۰ درصدی ظرفیت برشی بر

روی نمونه‌های مورد مطالعه را سبب می‌شود.

۹. در نمونه‌های تقویت‌شده با صفحه فولادی و گل‌میخ مشاهده گردید که الگوی ترک بیشتر به لبه‌های دال گسترش یافته است که بار شکست نیز در این نمونه‌ها بیشتر گردیده است. همچنین مشاهده گردید که در نمونه‌های با تعداد گل‌میخ بالاتر، گسترش ترک بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده است. همچنین در نمونه‌هایی با آرایش متفاوت گل‌میخ، گسترش ترک آرایش دایره‌ای نسبت به آرایش مربعی کمتر است و ترک همانند نمونه بدون تقویت در ناحیه بارگذاری متمرکز گردیده است.

۱۰. در این تحقیق، از تابع خطی به منظور توسعه مدل سطح پاسخ برای پیش‌بینی برش پانچ استفاده شد و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردید. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که افزایش قطر گل‌میخ بیشترین تأثیر و افزایش ابعاد صفحه فولادی کمترین تأثیر را بر ظرفیت برشی پانچ دال داشتند.

بیشتری نسبت به آرایش دایره‌ای با همان تعداد گل‌میخ می‌دهد.

۶. در صورت استفاده از صفحه فولادی و افزایش قطر، طول و تعداد گل‌میخ، ظرفیت اتلاف انرژی افزایش و تنش تحت بار یکسان کاهش یافته است. همچنین در صورت تغییر آرایش گل‌میخ‌ها به حالت مربعی نوع ۲ و دایره‌ای، ظرفیت اتلاف انرژی کاهش و تنش تحت بار یکسان افزایش یافته است.

۷. با افزایش ضخامت و ابعاد صفحه فولادی، ظرفیت اتلاف انرژی افزایش و تنش تحت بار یکسان افزایش یافته است.

۸. وجود بازشو در دال بر الگوی ترک ایجادشده تأثیر می‌گذارد و مشاهده شده که در اکثر نمونه‌ها اولین ترک در نزدیک‌ترین گوشه بازشو نسبت به ستون آغاز شده و به لبه‌های دال گسترش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Kadam, K. N., & Ingole, S. (2019). "Punching Shear Distribution of Flat Slab with Opening Adjacent to Column", In *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development*, 447-454.
- [2] Viswanathan, T. S., Mohan Ganesh, G., & Santhi, A. S. (2012). "Shear stress distribution of flat-plate using Finite Element Analysis", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(3), 914-923.
- [3] Hegger, J., Ricker, M., Ulke, B., & Ziegler, M. (2007). "Investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings", *Engineering Structures*, 29(9), 2233-2241.
- [4] Muttoni, A. (2008). "Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement", *ACI structural Journal*, 105, 440-450.
- [5] Park, H. G., Choi, K. K., & Chung, L. (2011). "Strain-based strength model for direct punching shear of interior slab-column connections", *Engineering Structures*, 33(3), 1062-1073.
- [6] Hegger, J., Sherif, A. G., Kueres, D., & Siburg, C. (2017). "Efficiency of various punching shear reinforcement systems for flat slabs", *ACI Structural Journal*, 114(3), 631.
- [7] Koppitz, R., Kenel, A., & Keller, T. (2013). "Punching shear of RC flat slabs-Review of analytical models for new and strengthening of existing slabs", *Engineering Structures*, 52, 123-130.
- [8] Hoang, L. C., & Pop, A. (2015). "Punching shear capacity of reinforced concrete slabs with headed shear studs", *Magazine of Concrete Research*.
- [9] Marí, A., Cladera, A., Oller, E., & Bairán, J. M. (2018). "A punching shear mechanical model for reinforced concrete flat slabs with and without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 166, 413-426.
- [10] Ebead, U., & Marzouk, H. (2002). "Strengthening of two-way slabs using steel plates", *Structural Journal*, 99(1), 23-31.
- [11] Sim, J., & Oh, H. (2005). "Structural improvement of strengthened deck panels with externally bonded plates", *Cement and concrete research*, 35(7), 1420-1429.

- [12] Silva, J. A., Marques, M. G., Trautwein, L. M., Gomes, R. B., & Guimarães, G. N. (2017). "Punching of reinforced concrete flat slabs with holes and shear reinforcement", *REM-International Engineering Journal*, 70(4), 407-413.
- [13] Abdulrahman, B. Q., Wu, Z., & Cunningham, L. S. (2017). "Experimental and numerical investigation into strengthening flat slabs at corner columns with externally bonded CFRP", *Construction and Building Materials*, 139, 132-147.
- [14] Santos, G. S., Melo, G. S., & Barros, J. A. (2019). "Punching CFRP-based strengthening solutions for reinforced concrete flat slabs", *Composite Structures*, 111077.
- [15] Navarro, M., Ivorra, S., & Varona, F. B. (2018). "Parametric computational analysis for punching shear in RC slabs", *Engineering Structures*, 165, 254-263.
- [16] Ricker, M., Häusler, F., & Randl, N. (2017). "Punching strength of flat plates reinforced with UHPC and double-headed studs", *Engineering Structures*, 136, 345-354.
- [17] Borges, L. L., Melo, G. S., Gomes, R. B., & Regan, P. E. (2013). "Punching shear of reinforced concrete flat plates with openings", *ACI Structural Journal*, 110(4), 547-556.
- [18] Teixeira, M. D., Barros, J. A., Cunha, V. M., Moraes-Neto, B. N., & Ventura-Gouveia, A. (2015). "Numerical simulation of the punching shear behaviour of self-compacting fibre reinforced flat slabs", *Construction and Building Materials*, 74, 25-36.
- [19] Safiee, N. A., & Ashour, A. (2017). "Prediction of punching shear capacity of RC flat slabs using artificial neural network", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 18(2), 285-309.
- [20] Marí, A., Cladera, A., Oller, E., & Bairán, J. M. (2018). "A punching shear mechanical model for reinforced concrete flat slabs with and without shear reinforcement", *Engineering Structures*, 166, 413-426.
- [21] Anil, Ö., Kina, T., & Salmani, V. (2014). "Effect of opening size and location on punching shear behaviour of two-way RC slabs", *Magazine of Concrete Research*, 66(18), 955-966.
- [22] Oliveira, D. C., Gomes, R. B., & Melo, G. S. (2014). "Punching shear in reinforced concrete flat slabs with hole adjacent to the column and moment transfer", *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 7(3), 414-467.
- [23] Ha, T., Lee, M. H., Park, J., & Kim, D. J. (2015). "Effects of openings on the punching shear strength of RC flat plate slabs without shear reinforcement", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(15), 895-911.
- [24] Oukaili, N. K., & Salman, T. S. (2014). "Punching shear strength of reinforced concrete flat plates with openings", *Journal of Engineering*, 20(1), 1-20.
- [25] Voyiadjis, G. Z., & Taqieddin, Z. N. (2009). "Elastic plastic and damage model for concrete materials: Part I-theoretical formulation", *The International Journal of Structural Changes in Solids*, 1(1), 31-59.
- [26] Khoshnood, H. R. (2012). Abaqus for reinforced concrete structures. Faculty of Civil Engineering.
- [27] Elbakry, H. M., & Allam, S. M. (2015). "Punching strengthening of two-way slabs using external steel plates", *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 1207-1218.
- [28] Tahouni, Sh. (2005). Design of reinforced concrete buildings. University of Tehran
- [29] Eom, T. S., & Park, H. G. (2010). "Evaluation of energy dissipation of slender reinforced concrete members and its applications", *Engineering Structures*, 32(9), 2884-2893.
- [30] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.

## مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو مقیاس کوچک و بزرگ برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای آن‌ها

دیوارهای برشی بتنی مسلح کوتاه با نسبت ارتفاع به طول کوچک‌تر از ۲، در ساختمان‌های کوتاه یا در طبقات پایین ساختمان‌های بلند یا در نیروگاه‌های هسته‌ای رایج‌اند. دیوارها با این تناسب هندسی، تغییرشکل برشی زیادی در مقایسه با تغییرشکل خمشی دارند. لذا در طراحی این دیوارها معمولاً مقاومت برشی حاکم خواهد بود. به‌همین ترتیب، پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای و به دنبال آن، دستیابی به طراحی این سازه نیاز به یک مدل‌سازی صحیح، کارا و جامع دارد که بتواند رفتار مشابه با واقعیت را از خود نشان دهد. در این تحقیق، پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه تحت بارهای جانبی در دو مقیاس کوچک و بزرگ براساس نتایج آزمایشات، راستی‌آزمایی و معرفی شده است. ابتدا مدل‌سازی با استفاده از یک نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی در مقیاس کوچک (نرم‌افزار Vector2) و سپس مدل‌سازی با نرم‌افزار کاربردی دیگری با توانمندی مدل‌سازی با مقیاس بزرگ (اپنسیس) صورت گرفته است. در نهایت، نتایج حاصل از این دو نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های این مقاله نشان می‌دهد که نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی Vector2 دارای دقت بالایی در مدل‌سازی پاسخ دیوارهای برشی کوتاه می‌باشد؛ ولی در صورتی که نیاز به مدل‌سازی دیوار برشی کوتاه در مقیاس بزرگ و در کنار یک سازه سه‌بعدی باشد، به شرط نسبت هندسی مناسب ارتفاع به طول دیوار، توصیه به استفاده از نرم‌افزار اپنسیس می‌شود.

**واژگان کلیدی:** دیوارهای برشی کوتاه، مدل‌سازی با مقیاس کوچک، مدل‌سازی با مقیاس بزرگ، اجزای محدود غیرخطی.

پریرسا سرتاجی\*

استادیار، گروه عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

پست الکترونیک:

p.sartaji@iauardabil.ac.ir

عبدالرضا سروقد مقدم

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

پست الکترونیک:

moghadam@iiees.as.ir

### ۱- مقدمه

اخیر صورت گرفته روی دیوارهای برشی نشان می‌دهد که در پاسخ غیرخطی آنها عوامل مختلفی دخالت دارد [۱-۴]. تعدادی از این عوامل عبارت‌اند از ابعاد دیوار و نسبت ارتفاع به طول آن، سطح نیروی محوری اعمالی بر آن (اندرکنش نیروی محوری-خمشی)، میزان آرماتور دیوار و چسبندگی مابین بتن و آرماتور، نسبت ظرفیت خمشی دیوار به ظرفیت برشی آن، صلبیت پی و فصل مشترک دیوار و فونداسیون آن، حرکت گهواره‌ای دیوار به واسطه لغزش آرماتور قائم در پی (چرخش جسم صلب)، ابعاد و آرماتور اعضای مرزی دیوار در صورت وجود، اثر عضوهای

رفتار دیوارهای برشی تحت اثر ترکیب تغییرشکل‌های خمشی، برشی و محوری قرار دارد. دیوارهای با ارتفاع متوسط تا بلند اکثراً دارای رفتار خمشی می‌باشند، در حالی که دیوارهای کوتاه اکثراً بوسیله تغییرشکل‌های برشی کنترل می‌شوند. نتایج آزمایشات

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۴، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸.  
(DOI): 10.22091/cer.2019.3946.1138 شناسه دیجیتال

دیوارهای برشی گاردن هتل<sup>۴</sup> در گوانگژو<sup>۵</sup> را به‌منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای و اصلاح عملکرد سازه‌های دارای دیوار برشی، تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای کم قرار دادند. سپس به تحلیل عددی آزمایشات بار چرخه‌ای دیوارهای برشی با برنامه تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی (SWNA<sup>۶</sup>) که توسعه ثانویه‌ای در نرم‌افزار اپنسیس<sup>۷</sup> است، پرداختند. مقایسه نتایج عددی با آزمایشات، دقت این روش تحلیل را در نشان دادن رفتار غیرخطی دیوار برشی، مانند انتقال محورخشی، تغییرشکل برشی، فروریختگی موضعی و مکانیسم خرابی تأیید کرد [۷].

محمدی‌دارانی و سروقد مقدم، به نحوه مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو نرم‌افزار سپ<sup>۸</sup> و پرفورم تری دی<sup>۹</sup> پرداختند. برای این منظور از پنج نمونه آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی برای راستی‌آزمایی نرم‌افزارها استفاده کرده و نحوه مدل‌سازی و اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در این نرم‌افزارها را ارائه نمودند [۸].

محققان در تحقیقی به بررسی اثر آرایش میلگرد بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی کوتاه پرداختند. در این مقاله رفتار دیوارهای برشی کوتاه بتن آرمه، به کمک برنامه اجزای محدود غیرخطی ATENA 3D مورد بررسی قرار گرفته و ضمن ارزیابی نوع گسیختگی، مقاومت برشی نهایی و مقاومت پسماند، تأثیر پارامترهایی نظیر تمرکز میلگردهای طولی و عرضی در لبه دیوار، استفاده از میلگردهای قطری و تغییر فواصل میلگردهای افقی و قائم، بر روی رفتار دیوارهای برشی کوتاه مطالعه شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که برخلاف دیوارهای بلند، تمرکز میلگردها در لبه دیوار راه حل مناسبی برای افزایش شکل‌پذیری نمی‌باشد [۹].

سازه‌های متصل به دیوار (مانند تیرهای هم‌بسته، قاب خمشی، و غیره). بنابراین، در مدل‌سازی دیوارهای برشی بتن مسلح به منظور شبیه‌سازی درست رفتار آن، باید اثر عوامل فوق، به‌ویژه اندرکنش نیروی محوری-خمشی و شرایط مرزی دیوار منظور گردد. مدل تحلیلی باید قادر به تخمین ظرفیت دیوار تحت بار جانبی یکنوا و رفتار آن تحت بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی باشد. مدل عددی ایده‌آل باید همچنین قادر باشد پدیده‌های دیگر نظیر ترک‌خوردگی بتن، سخت‌شدگی کششی، باز و بسته شدن ترک‌ها با اصلاح سختی، کاهش مقاومت در بارگذاری چرخه‌ای، اثر محصورشدگی در فشار و غیره را نشان دهد. اغلب یک یا چند مورد از این عوامل به منظور ساده‌سازی در مدل‌های تحلیلی، صرف‌نظر شده است. با این فرض که این عوامل اثر مهمی در افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی رفتار متفاوت دیوارهای بتنی مسلح نخواهد داشت [۵]. پیش‌بینی رفتار این دیوارها تحت بارهای جانبی نیازمند ابزارهای عددی راستی‌آزمایی شده به وسیله آزمایشات تجربی می‌باشد. این ابزارها در محاسبات، باید اکثر پارامترهای مهم که می‌توانند در پاسخ دیوارهای بتن مسلح اثر بگذارند را در نظر بگیرند.

گولس و ویتاکر<sup>۱</sup>، از نرم‌افزار اجزای محدود اباکوس<sup>۲</sup> و Vector2 برای مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه استفاده نمودند. این دو برنامه برای پیش‌بینی پاسخ یکنواخت و چرخه‌ای دیوارهای کوتاه مورد استفاده قرار گرفته است. هر برنامه دارای رویکرد متفاوتی در شبیه‌سازی رفتار بتن مسلح می‌باشد. در این تحقیق، روش‌های مدل‌سازی برای پیش‌بینی پاسخ بحرانی دیوارهای برشی کوتاه بررسی شده و پیشنهاداتی برای تحلیل‌های اجزای محدود ارائه شد [۶].

ایکسیاولی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۲ نمونه دیوار برشی با نسبت آرماتور متفاوت و مطابق با جزییات سازه‌ای

4- Garden Hotel

5- Guangzhou

6- Shear Wall Nonlinear Analysis

7- OpenSees

8- SAP 2000

9- PERFORM 3D

1- Gulec and Whittaker

2- Abaqus

3- Xiaolei

تهرانی‌زاده و عزیززاده، به معرفی روش‌های کاربردی مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای برشی بتنی در نرم‌افزارهای پرفورم تری دی، سپ و ایتبس پرداختند. پژوهشگران با انجام تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی در حالت‌های مختلف مدل‌سازی، مقایسه‌ای بر روی نتایج حاصل انجام دادند. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که در نرم‌افزارهایی مانند سپ و ایتبس محدودیت‌هایی در مدل‌سازی غیرخطی دیوارها به‌ویژه در زمینه عملکرد دیوارهای متصل و عمود برهم و عملکرد دال و دیوار در سیستم‌های فاقد تیر و ستون وجود دارد. با توجه به پیچیده و زمان‌بر بودن مدل‌های دقیق اجزای محدود، استفاده از مدل‌های الیافی موجود در نرم‌افزار پرفورم تری دی نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی را پیشنهاد دادند [۱۳].

سقایان و ناطقی‌الهی، به بررسی دقت مدل‌های تحلیلی موجود در پیش‌بینی پاسخ غیرخطی دیوارها پرداختند. در این بررسی، مدل‌ها در ابتدا با نرم‌افزار غیرخطی اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شد و سپس با سه روش ستون معادل، معادل‌سازی با خرپا در نرم‌افزار سپ و استفاده از عضوهای الیافی در نرم‌افزار پرفورم تری دی مقایسه شد. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی نمودارهای برش پایه- تغییرمکان و برش پایه طبقات در تغییرمکان هدف، روش مدل‌سازی دیوار برشی با عضوهای الیافی در مقایسه با سایر روش‌ها، رفتار دیوار برشی را شبیه‌تر به روش اجزای محدود پیش‌بینی می‌کند. روش معادل‌سازی با خرپا در مقایسه با روش ستون معادل دقیق‌تر بود؛ زیرا در این روش عضو مهاربند، رفتار برشی دیوار را شبیه‌سازی می‌کند و نسبت به روش ستون معادل که در آن، رفتار برشی دیوار توسط عضو شبیه‌سازی نمی‌شود، دقیق‌تر است. روش ستون معادل تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در تغییرمکان هدف را شبیه‌تر به روش اجزای محدود پیش‌بینی می‌کند. در هر سه روش

غنی‌زاده و همکاران، به بررسی تأثیر بار محوری و مشخصات مصالح بر عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی کوتاه پرداختند. در این مقاله، رفتار دیوار برشی کوتاه با کمک برنامه اجزای محدود ATENA 3D مورد تحلیل قرار گرفته و به بررسی نوع گسیختگی، مقاومت برشی نهایی، مقاومت پسماند و اثر عواملی چون بار محوری و مشخصات مصالح بر رفتار دیوارهای برشی کوتاه پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که بار محوری اثر قابل توجهی بر رفتار شکل‌پذیر دیوارهای برشی کوتاه و مد گسیختگی آن‌ها دارد [۱۰].

پژوهشگران، در تحقیقی به بررسی اثر بازشو بر رفتار دیوارهای برشی کوتاه پرداخته و با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، تأثیر بازشو بر رفتار دیوار و تغییر حالت دیوار به قاب را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی از نرم‌افزار اجزای محدود VecTor2 برای مدل‌سازی استفاده شد. آن‌ها به‌منظور کنترل دقت نرم‌افزار، از نمونه دیوار SW13 که توسط لفاس<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۰ تحت آزمایش‌های استاتیکی افزایش یافته قرار گرفته بود، استفاده نمودند [۱۱].

گروهی دیگر از محققان، به شرح و مقایسه قابلیت‌های دو روش مدل‌سازی دیوارهای برشی سه‌بعدی شامل مدل‌های با مقیاس کوچک و مدل‌های با مقیاس بزرگ پرداختند. در بررسی قابلیت مدل‌سازی با مقیاس کوچک از نرم‌افزار آباکوس و مدل‌های با مقیاس بزرگ از نرم‌افزار اپنسیس استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که در یک سری از دیوارها که نسبت ارتفاع به طول برابر ۰/۷ و رفتار دیوار به صورت برشی بوده است، مدل‌های الیافی<sup>۱۱</sup> موجود در نرم‌افزار اپنسیس برای این نوع دیوارها دارای نقص بوده و نتایج مدل‌سازی اجزای محدود تطابق مناسبی با واقعیت داشته است [۱۲].

<sup>۱۰</sup>- Lefas

<sup>۱۱</sup>- Fiber

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده و پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی ارائه شده است.

## ۲- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در مطالعه آزمایشگاهی

نمونه‌های مورد بررسی دو نمونه U1 و U1.5 از آزمایشات کونگ و هو می‌باشد [۲]. مشخصات و جزئیات نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

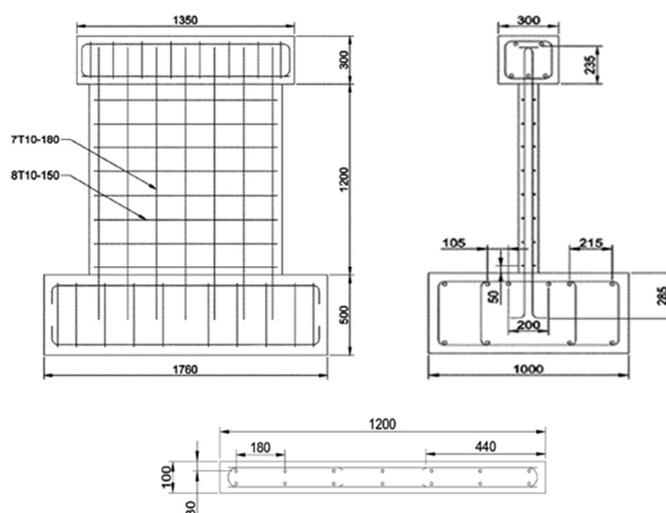
نمونه‌ها دارای سطح مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. ارتفاع نمونه‌ها، در نمونه U1، ۱۲۰۰ و در نمونه U1.5، ۱۸۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در نتیجه، نمونه‌ها دارای نسبت ارتفاع به طول ۱ و ۱/۵ می‌باشند. مقاومت فشاری بتن در نمونه U1، ۳۰/۴، در نمونه U1.5، ۳۴/۹ و مقاومت تسلیم فولاد در تمام نمونه‌ها ۵۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. سطح مقطع، ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

معادل‌سازی محدوده خرابی درست پیش‌بینی شده است [۱۴].

در اکثر کارهای انجام یافته در مدل‌سازی دیوارهای برشی، مدل‌سازی اکثراً بر روی دیوارهای بلند صورت گرفته و به نحوه مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه که دارای رفتار برشی می‌باشند، کمتر توجه شده است. در این کار، ضمن استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود دقیق با توان مدل‌سازی در مقیاس کوچک، سعی شده است از نرم‌افزار دیگری با توانایی مدل‌سازی در مقیاس بزرگ که اندرکنش پاسخ‌های خمشی و برشی دیوارهای برشی کوتاه را لحاظ کند، پرداخته شود. به این منظور نرم‌افزار اپنسیس بکار برده شده و تلاش شده است تا پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه با راستی‌آزمایی توسط نتایج آزمایشات ارائه شود. در نهایت، راهکارهای اساسی برای تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی دیوارهای برشی کوتاه ارائه گردد. برای این منظور، از نمونه‌های ارائه شده در آزمایشات کوانگ و هو استفاده شده است [۲]. مدل‌های تهیه شده در دو نرم‌افزار

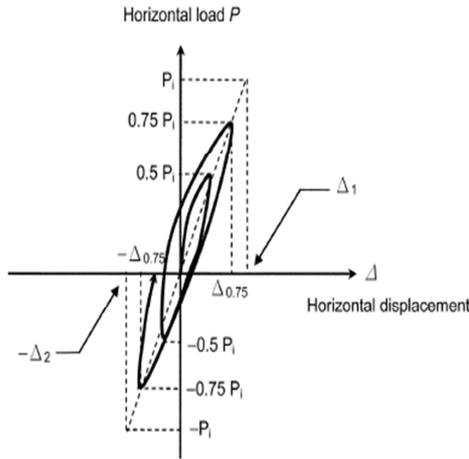
جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها [۲]

نمونه	نسبت ارتفاع به طول	محصورشدگی عضوهای مرزی	$f'_c$ بتن (MPa)	آرماتور طولی ( $\rho_s$ %)	آرماتور عرضی ( $\rho_v$ %)
U1.0	۱	ندارد	۳۰/۴	۰/۹۲	۱/۰۵
U1.5	۱/۵	ندارد	۳۴/۹	۰/۹۲	۱/۰۵



شکل ۱- سطح مقطع، ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری نمونه U1 و U1.5 [۲]

همچنین، جابه‌جایی تسلیم، ضریب شکل‌پذیری جابه‌جایی و ظرفیت اتلاف انرژی نرمال شده نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- تاریخچه بارگذاری اعمالی [۲]

با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه، حداکثر بار گسیختگی تجربی نمونه‌ها،  $P_{max}$  بسیار کمتر از مقاومت برشی تئوری  $V_u$  است و این نشان می‌دهد که در مقاومت نمونه‌ها، عموماً مود خمشی حاکم بوده است. در شکل ۳، حلقه‌های هیستریک حاصل از آزمایش نمونه‌های U1 و U1.5 نشان داده شده است.

در این آزمایش، نمونه‌ها بر روی کف صلب نصب شده‌اند. بار قائم در ابتدا بر تیر بالای دیوار به وسیله جک هیدرولیکی وارد می‌شود. بار جانبی به صورت رفت و برگشتی به وسیله یک محرک کمکی بر تیر بالای دیوار وارد شده است. یک چرخه بارگذاری افقی تا  $\pm 0.5P_i$  و سپس تا  $\pm 0.75P_i$  اعمال شده است، که بار  $P_i$  بار وارد شده در انتهای نمونه وقتی که نمونه دیوار به مقاومت نهایی خمشی  $M_u$  خود می‌رسد، بوده است. مقدار  $M_u$  براساس BS 8110 با استفاده از بلوک تنش مستطیلی برای بتن در حالت حدی نهایی بدون در نظر گرفتن ضرایب جزئی ایمنی تعیین شده است. شکل ۲ رابطه بار- تغییرمکان چرخه‌ای رفت و برگشتی عمومی اعضای بتن مسلح تحت آزمایش را نشان می‌دهد. جابه‌جایی تسلیم می‌تواند از رابطه (۱) تعیین شود:

$$\Delta_y = \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2|}{2} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\Delta_1$  و  $\Delta_2$ ، جابه‌جایی افقی متناظر با بار جانبی  $P_i$  و  $-P_i$  است. در جدول ۲، نوع گسیختگی و مقاومت تئوری و ماکزیمم نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۲- نوع گسیختگی و مقاومت تئوری و آزمایشگاهی نمونه‌ها [۲]

نمونه	مقاومت تئوری		حداکثر بار آزمایش $P_{max}$ (kN)	مود گسیختگی
	$V_u$ (kN)	$P_i$ (kN)		
U1.0	۷۳۷	۳۲۱	۳۶۰	تسلیم آرماتور و خردشدگی بتن
U1.5	۶۸۹	۲۴۶	۲۷۷	در نواحی مرزی دیوارها

جدول ۳- جابه‌جایی تسلیم، شکل‌پذیری، و ظرفیت جذب انرژی [۲]

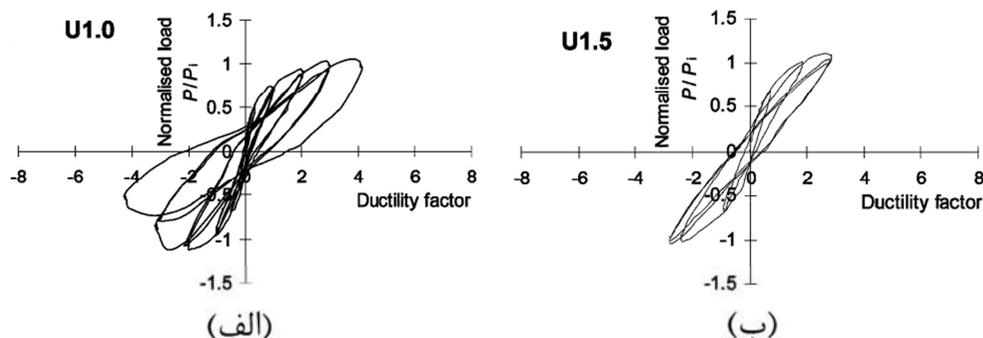
نمونه	جابه‌جایی تسلیم	ضریب شکل‌پذیری جابه‌جایی ( $\mu$ )	اتلاف انرژی نرمال شده	
			En	مقادیر نسبی
U1.0	۳/۸	۳/۱	۱۰/۰	۱/۶۷
U1.5	۵/۰	۲/۸	۶/۰	۱/۰۰

دو رویکرد اصلی در مدل‌سازی اعضای بتنی مسلح، مدل‌سازی با مقیاس کوچک و مدل‌های با مقیاس بزرگ است. مدل‌سازی با مقیاس کوچک شامل تحلیل اجزای

### ۳- مدل‌های با مقیاس کوچک در مقابل مدل‌های با مقیاس بزرگ

به کار می‌رود. این رویکرد، پیچیده بوده و نیاز به توانایی پردازش عددی بالایی دارد؛ لذا، این روش برای سازه‌های بزرگ کاربردی نبوده و محدود به اجزای منفرد سازه‌ای مانند یک ستون، یا یک تیر یا یک دیوار است.

محدود یا تحلیل با به‌کارگیری اعضای مدل شده به روش الیافی براساس نشان دادن رفتار مصالح مختلف موجود در عضو بتن مسلح و اندرکنش بین آن‌ها است. در اینجا عضو به اجزای کوچکی تجزیه شده و اصول تعادل برای هر جزء



شکل ۳- حلقه هیستریک نمونه U1 و نمونه U1.5 [۲].

از سوی دیگر، مدل‌سازی با مقیاس بزرگ، براساس نشان دادن رفتار کلی عضو بتنی مسلح، مانند تغییرشکل، مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی است. رفتار کلی عضو بتنی مسلح با استفاده از مدل‌های با مقیاس بزرگ باید با استفاده از تأییدهای آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردد تا پارامترهای مورد نیاز برای مدل به‌دست آیند. این رویکرد، ساده بوده و نیاز به محاسبات عددی فراوانی ندارد. از این‌رو، برای مدل‌سازی پاسخ سازه‌های بزرگ مناسب است. مدل‌های با مقیاس بزرگ برای دیوارهای برشی بتن مسلح شامل، عضو تیر-ستون دو مؤلفه‌ای<sup>۱۲</sup>، عضو تیر-ستون تک مؤلفه‌ای<sup>۱۳</sup>، مدل چند فنری<sup>۱۴</sup>، مدل فنری چند محوره<sup>۱۵</sup> (مدل MS)، مدل‌های خرپا<sup>۱۶</sup> و مدل‌های ترکیبی<sup>۱۷</sup> که آن نیز شامل، مدل عضو سه خطی قائم (TVLE)<sup>۱۸</sup> و مدل عضو چند خطی قائم (MVLE)<sup>۱۹</sup> است [۵].

Vector2 نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی برای تحلیل سازه‌های بتن مسلح غشایی دوبعدی می‌باشد [۱۵]. این برنامه در دانشگاه تورنتو در سال ۱۹۹۰ تهیه شده است و تا به امروز با تغییرات اعمال شده کامل‌تر گردیده است. اساس تئوری برنامه Vector2 بر تئوری میدان فشار اصلاح شده (MCFT<sup>۲۰</sup>) و مدل میدان تنش دگرگون شده (DSFM<sup>۲۱</sup>) در شبیه‌سازی رفتار بتن مسلح می‌باشد. الگوریتم MCFT و DSFM در Vector2 با فرض تنش مسطح فرمول‌سازی شده است. این ابزارها دارای دقت بالایی در پیش‌بینی پاسخ دیوار کوتاه می‌باشند [۶].

نرم‌افزار VecTor2 لیستی از مدل‌های مشخصه برای نشان دادن رفتار بتن و آرماتور دارد. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی پدیده‌هایی نظیر اثرات کششی-سخت‌شوندگی<sup>۲۲</sup>، اثرات کششی-نرم‌شوندگی<sup>۲۳</sup>، رفتار انبساطی<sup>۲۴</sup>، ترک‌خوردگی بتن، کنترل عرض ترک بتن، کاهش مقاومت و سختی در بارگذاری چرخه‌ای، اثر محصورشدگی در فشار، رفتار هیستریک آرماتور، کرنش

#### ۴- مدل‌سازی دیوار برشی در نرم‌افزار Vector2

12- Two-component beam-column element

13- One-component beam-column element

14- Multiple spring model

15- Multi-axial spring model

16- Truss models

17- Combined models

18- Three Vertical Line Element (TVLE) model

19- Multiple Vertical Line Element (MVLE) model

20- Modified Compression Field Theory

21- Disturbed Stress Field Model

22- Tension-Stiffening

23- Tension-Softening

24- Dilatational characteristics

صورت استفاده از المان چهار گرهی نیز باید اشاره نمود که امکان مش‌بندی مقطع مورد نظر در راستای ضخامت وجود ندارد.

از میان روش‌های مختلف مدل‌سازی دیوار برشی بتن مسلح در نرم‌افزار اپنسیس، عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان<sup>۲۷</sup> و عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمشی و برش<sup>۲۸</sup>، که رایج‌تر می‌باشند، برای بررسی و راستی‌آزمایی در این کار انتخاب شده‌اند و قطعاً عضوهای تازه ارائه شده در این نرم‌افزار، حالت‌های بیشتری را پوشش خواهند داد.

#### ۵-۱- عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان

عمومی‌ترین روش برای معرفی اعضای دیوار برشی و اجزای قاب، در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان است که توسط تاوسر<sup>۲۹</sup> و همکاران توسعه یافته است [۱۷]. در این عضو، مقطع به تعدادی الیاف بتنی و فولادی تقسیم‌بندی می‌شود و قوانین تنش-کرنش تک‌محوری استفاده می‌شود تا پاسخ مواد را در امتداد طولی (موازی با محور عضو) به دست آورد. در این روش، تغییرشکل‌های برشی در مقطع قابل تعیین نبوده و اندرکنش پاسخ خمشی و برشی در فرمول‌بندی مقطع الیافی منظور نمی‌شود [۱۷].

در نرم‌افزار اپنسیس، مشخصه‌های رفتاری مختلفی برای بتن و فولاد وجود دارد. در مدل‌سازی دیوار برشی کوتاه با استفاده از عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، مشخصه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با راستی‌آزمایی توسط نتایج آزمایشات، رفتار مشخصه

سخت‌شونده، اثر بوشینگر آرماتور فولادی و کمانش آرماتور می‌باشد. همچنین علاوه بر امکان مدل‌سازی آرماتور قائم، افقی و آرماتور انتظار، امکان مدل‌سازی آرماتور قطری در دو امتداد که در دیوارهای بتنی مسلح کوتاه عموماً استفاده می‌شود، در نرم‌افزار وجود دارد [۶].

#### ۵- مدل‌سازی دیوار برشی در نرم‌افزار اپنسیس

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی دیوار برشی در نرم‌افزار اپنسیس موجود است [۱۶]. از آن جمله می‌توان به انواع مختلف عضوهای تیر-ستون برای مدل‌سازی دیوارهای برشی بتن مسلح اشاره نمود. در مدل‌سازی با عضوهای تیر-ستون، دیوار برشی به صورت یک ستون معادل، با اختصاص مختصات گره ابتدا و انتها مدل‌سازی می‌شود. برای مقطع دیوار برشی، مقطع فایبر تعریف می‌شود که مش‌بندی مقطع فایبر با تعریف تعداد تقسیمات در دو امتداد (در زمان تعریف مقطع) صورت می‌گیرد و مش‌بندی در امتداد ارتفاع دیوار برشی با تعریف تعداد نقاط انتگرال‌گیری انجام می‌شود.

از دیگر روش‌های مدل‌سازی دیوار برشی می‌توان به پوسته<sup>۲۵</sup> و عضو چهارگره‌ای<sup>۲۶</sup> اشاره نمود. مدل‌سازی با پوسته و عضو چهارگره‌ای به صورت تعریف مختصات چهار نقطه اطراف دیوار برشی خواهد بود. در استفاده از پوسته، برای مدل‌سازی دیوار برشی، باید برای دیوار، مقطع تعریف نمود که می‌توان از فایبر به عنوان مقطع استفاده کرد. مش‌بندی در مقطع فایبر امکان‌پذیر است ولی برای مش‌بندی در ارتفاع، نقطه انتگرال‌گیری برای این عضو وجود ندارد و باید در طول دیوار برشی به تعداد بسیار زیاد از این عضو تعریف نمود و برای تک تک اعضا مختصات چهار نقطه اطراف دیوار را وارد کرد که مش‌بندی در ارتفاع را تشکیل می‌دهد. انجام این پروسه، زمان‌بر بوده و حجم محاسبات بالایی خواهد داشت. در

<sup>27</sup>- Displacement Based Beam-Column Element

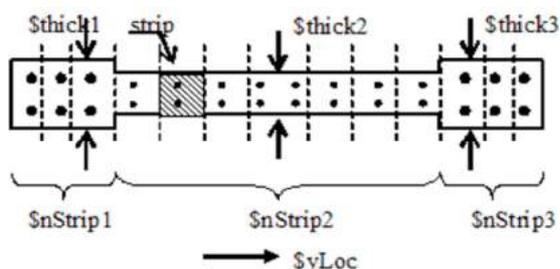
<sup>28</sup>- Flexure shear interaction displacement based beam-column element

<sup>29</sup>- Taucer

<sup>25</sup>- Shell

<sup>26</sup>- Quad

امکان‌پذیر نمی‌باشد. مقطع این عضو، فایبر اینت<sup>۳۴</sup> نامیده می‌شود که از تعدادی لایه تشکیل شده است و شامل الیاف‌های قائم برای نشان دادن مصالح بتن و فولاد و الیاف‌های افقی برای نشان دادن آرماتور افقی، می‌باشد (شکل ۴) [۱۸].



شکل ۴- مدل‌سازی مقطع عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش [۱۸]

در مدل‌سازی با این عضو از مدلی تحت عنوان Concrete 06 برای بتن استفاده می‌شود. این مدل، برای نشان دادن رفتار بتن در اعضای غشایی تهیه شده است. در این مدل، قوانین مشخصه مواد در فشار براساس منحنی ترنفلدت<sup>۳۵</sup> که مشابه تعریف پوپوویکس<sup>۳۶</sup> است، تعریف شده است. با بررسی مشخصه‌های رفتاری مختلف برای فولاد، در این عضو، Steel 02، برای تعریف رفتار آرماتور فولادی پیشنهاد می‌شود.

## ۶- مدل‌سازی نمونه U1

در ابتدا مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2 انجام گرفته است. بار محوری به میزان ۱۱۵ کیلونیوتن و بار جانبی ابتدا به صورت استاتیکی یکنواخت تا مقدار ۳۲۱ کیلونیوتن و سپس به صورت چرخه‌ای براساس تاریخچه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲ بر نقطه انتهایی دیوار اعمال شده است. در ابتدا، مدل‌سازی براساس مدل‌های پیش‌فرض نرم‌افزار انجام گرفته است. به صورت پیش‌فرض، رفتار بتن در ناحیه قبل از پاسخ

بتن، Concrete 01 و رفتار فولاد، Steel 02 انتخاب شده است. بتن Concrete 01، دارای ناحیه فشاری براساس مدل اصلاح شده پارک و کنت<sup>۳۰</sup> و مقاومت ناحیه کششی صفر می‌باشد. مدل Steel 02، براساس مدل تک محوری فولاد گیوفر-منقوتو-پینتو<sup>۳۱</sup> می‌باشد که دارای ویژگی کرنش سخت‌شوندگی ایزوتوپیک<sup>۳۲</sup> است.

## ۵-۲- عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش

به منظور وارد کردن اندرکنش خمش-برش مشاهده شده در آزمایشات تجربی، اراکال<sup>۳۳</sup> و همکاران یک مدل تحلیلی پیشنهاد کردند که رفتار پانل بتنی مسلح مبتنی بر رویکرد چرخش-دوران را با مدل عضو چندخطی قائم ترکیب می‌کند [۱۸]. مدل اندرکنش خمش-برش شامل اصلاح مدل MVLEM با قرار دادن یک فنر برشی برای هر عضو تک محوری است. پس از آن هر عضو تک محوری به عنوان یک عضو پانل بتنی مسلح، با عملکرد غشایی، با تنش‌های عمودی و برشی یکنواخت که در امتداد داخل صفحه وارد می‌شوند، رفتار می‌کند. به این ترتیب، اندرکنش مابین خمش و برش در سطح عضو تک محوری ترکیب می‌شود. این روش شامل اجرای روش اجزای محدود با یک مدل مشخصه بتن مسلح غشایی است [۱۸].

اگرچه مدل‌های مصالح می‌توانند دارای رفتار چرخه‌ای باشند، اما فرمول‌بندی این مدل، برای تحلیل‌های استاتیکی یکنواخت تکمیل و راستی‌آزمایی شده است. معادلات سازگاری مربوط به تغییرمکان‌های گرهی (۶ درجه آزادی) و کرنش‌های داخلی (کرنش محوری، انحنای و کرنش برشی) تنها در یک صفحه دوبعدی تعریف شده است. بنابراین تحلیل سه‌بعدی با این عضو

<sup>34</sup>- FiberInt

<sup>35</sup>- Thorenfeldt

<sup>36</sup>- Popovics

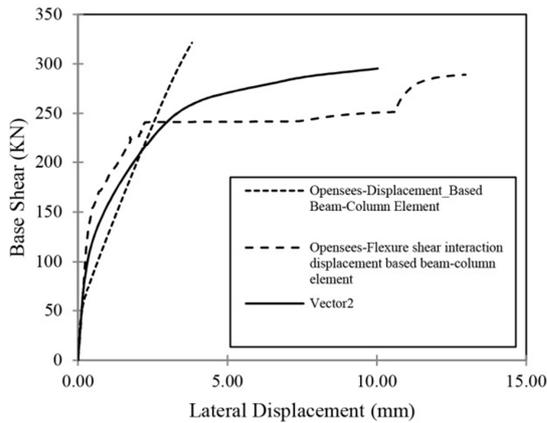
<sup>30</sup>- Modified Kent & Park

<sup>31</sup>- Giuffer-Menegotto-Pinto

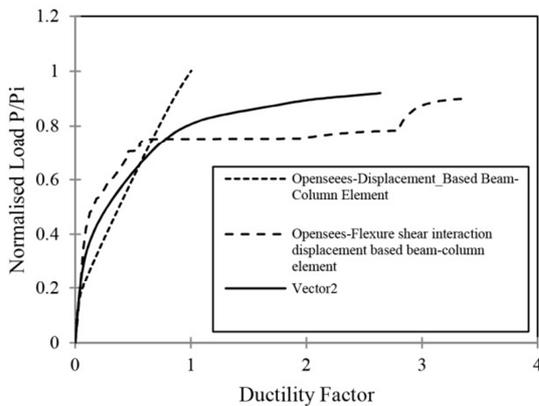
<sup>32</sup>- Isotropic strain hardening

<sup>33</sup>- Orakcal

داده شده است.



شکل ۵- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار



شکل ۶- نمودار برش پایه هم‌پایه شده  $P/P_i$  - ضریب

شکل‌پذیری  $\Delta/\Delta_y$

میزان جابه‌جایی تسلیم در بارگذاری چرخه‌ای در نرم‌افزار اپنسیس و عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، با استفاده از رابطه (۱) به صورت زیر محاسب می‌گردد:

$$\text{میزان جابه‌جایی تسلیم} = (3/78 + 3/82) \div 2 = 3/8$$

در جدول ۳ مقدار این پارامتر در آزمایش نیز  $3/8$  ارائه شده است.

در مدل‌سازی با استفاده از عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش، از آنجاکه این عضو فقط قابلیت تحلیل استاتیکی یکنواخت و تحلیل دوبعدی را دارا می‌باشد؛ امکان انجام تحلیل چرخه‌ای در این عضو وجود ندارد [۱۸].

حداکثر، براساس مدل هوگنستاد (پارابولا) <sup>۳۷</sup> و در ناحیه پس از پاسخ حداکثر، مدل اصلاح شده پارک- کنت و پاسخ هیستریک آن، لینیر دلبیو/ پلاستیک افستس <sup>۳۸</sup> می‌باشد. پاسخ هیستریک فولاد با لحاظ اثر بوشینگر (سکین) <sup>۳۹</sup> و در مدل‌سازی از آرماتور فولادی شکل‌پذیر <sup>۴۰</sup> استفاده شده است.

در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس از دو عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش استفاده شده است. در تمامی مدل‌ها دیوار برشی با تیر بالا و پایین (فونداسیون) مدل‌سازی شده است. همانند مدل‌سازی پیشین، بار محوری به میزان ۱۱۵ و بار جانبی ابتدا به صورت استاتیکی یکنواخت تا مقدار ۳۲۱ کیلونیوتن و سپس به صورت چرخه‌ای براساس تاریخچه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲ بر نقطه انتهای دیوار اعمال شده است. منحنی‌های مختلف رفتاری برای بتن و فولاد مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت رفتار فولاد Steel 02 و رفتار بتن در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، Concrete 01 و در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش، Concrete 06 منظور شده است.

در شکل ۵، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهای دیوار و در شکل ۶، برش پایه هم‌پایه شده در مقابل ضریب شکل‌پذیری برای دو نرم‌افزار رسم شده است.

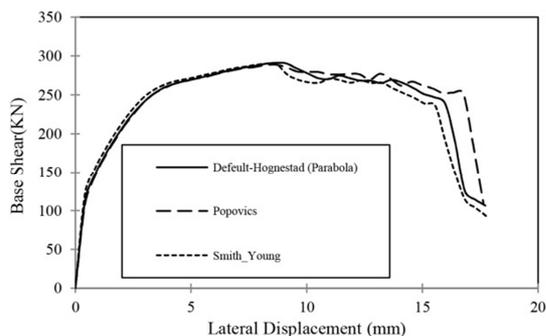
در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس، میزان تغییرمکان جانبی، در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، در بار جانبی ۳۲۱ کیلونیوتن،  $3/81$  میلیمتر به دست آمده است. در شکل ۷، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهای دیوار برای بارگذاری چرخه‌ای نشان

<sup>37</sup>- Hognestad (Parabola)

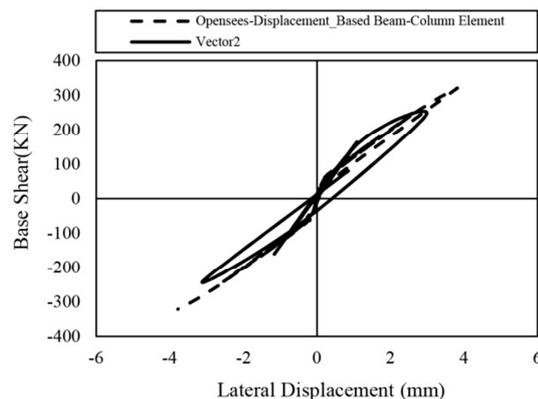
<sup>38</sup>- Linear w/Plastic Offsets

<sup>39</sup>- Bauschinger Effect (Seckin)

<sup>40</sup>- Ductile steel Reinforcement



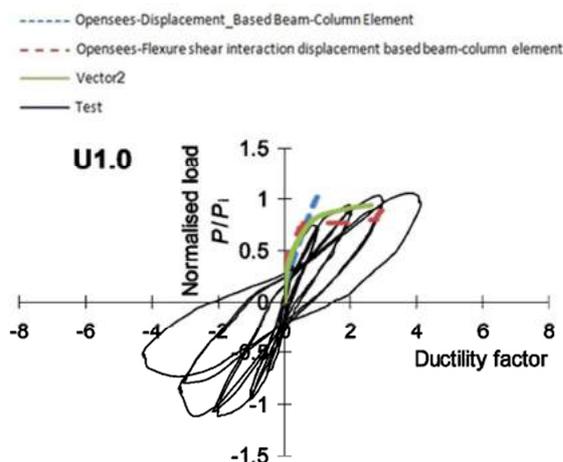
شکل ۹- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار، مقایسه پاسخ با تغییر رفتار بتن، برای سه مدل هوگنستاد، پوپویکس و اسمیت-یانگ



شکل ۷- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار بارگذاری چرخه‌ای

۱-۶- مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار اپنسیس و Vector2 و آزمایش در نمونه U1

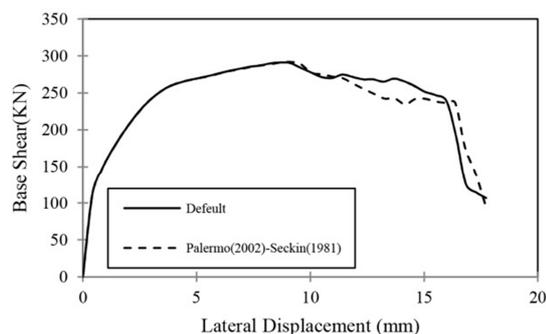
در این قسمت نتایج حاصل از نرم‌افزارهای اپنسیس و Vector2 با نتیجه آزمایش مقایسه شده است و در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰- نمودار برش پایه هم‌پایه شده  $P/P_1$  - ضریب شکل‌پذیری  $\Delta/\Delta_y$

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مدل تهیه شده با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2 انطباق کاملی با نتیجه آزمایش دارد. در نرم‌افزار اپنسیس، در مدل‌سازی با عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، مقدار سختی کوچک‌تر و مقاومت بزرگ‌تری نسبت به نتیجه آزمایش تخمین زده شده است. در استفاده از عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش و برش، سختی بزرگ‌تر و مقاومت کوچک‌تری نسبت به نتیجه آزمایش

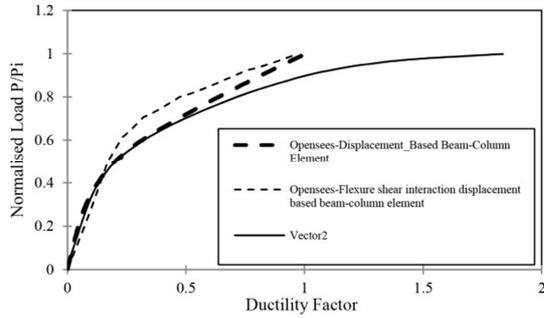
در مرحله بعد از مدل‌سازی، مدل‌های پیش‌فرض نرم‌افزار Vector2 برای رفتار هیستریک بتن (لینیر دبلینو/ پلاستیک افستس) و فولاد (بوشینگر افکت (سکین)) با مدل پالرمو<sup>۴۱</sup> (۲۰۰۲) برای بتن و سکین (۱۹۸۱) برای فولاد مقایسه و در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار، مقایسه پاسخ‌ها با تغییر رفتار هیستریک بتن و فولاد

همانطور که ذکر شد، به‌صورت پیش‌فرض رفتار بتن در ناحیه قبل از پاسخ، حداکثر هوگنستاد (پارابولا) لحاظ شده است. پیش‌فرض نرم‌افزار با دو مدل دیگر بتن یعنی پوپویکس (۱۹۷۳) و اسمیس- یانگ (۱۹۵۶) مقایسه و در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در دو نمودار ۸ و ۹ دیده می‌شود با تغییر رفتار بتن و فولاد در مدل‌های مقایسه شده، تنها تفاوت در ناحیه بعد از مقاومت حداکثر دیده شده است.

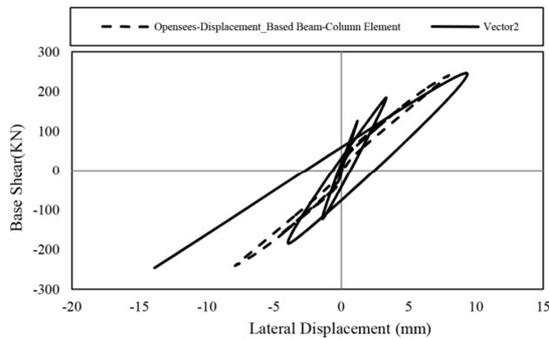
41- Palermo



شکل ۱۲- نمودار برش پایه هم‌پایه شده  $P/P_i$  -ضریب شکل‌پذیری  $\Delta/\Delta_y$

در جدول ۳ مقدار این پارامتر در آزمایش نیز ۵/۰ ارائه شده است.

میزان جابه‌جایی در بار جانبی ۲۴۶ کیلونیوتن، در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، ۵/۰۳ میلی‌متر به‌دست آمده است. این جابه‌جایی، در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش، ۴/۸۶ میلی‌متر به‌دست آمده است.



شکل ۱۳- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار، بارگذاری چرخه‌ای

### ۱-۷ مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار اپنسیس و Vector2 و آزمایش در نمونه U1.5

در این قسمت، نتایج حاصل از نرم‌افزارهای اپنسیس و Vector2 و آزمایش با هم مقایسه شده و در شکل ۱۴ ارائه شده است.

در هر سه روش مدل‌سازی، شیب قسمت الاستیک خطی انطباق کامل با نتیجه آزمایش دارد. مانند نمونه قبل، مدل تهیه شده با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2

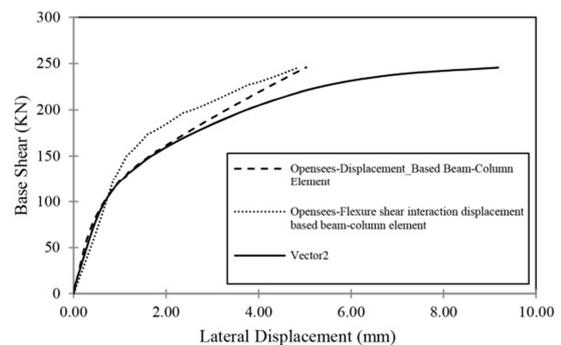
حاصل شده است. در کل، شکل کلی نمودار در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش و برش، انطباق خوبی با نتیجه آزمایش دارد.

### ۷- مدل‌سازی نمونه U1.5

مانند نمونه قبل، ابتدا مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2 انجام گرفته است. در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس، از دو عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش استفاده شده است. در شکل ۱۱، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهای دیوار و در شکل ۱۲ برش پایه هم‌پایه شده در مقابل ضریب شکل‌پذیری برای دو نرم‌افزار رسم شده است. در شکل ۱۳، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهای دیوار برای بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است.

میزان جابه‌جایی تسلیم در بارگذاری چرخه‌ای در نرم‌افزار اپنسیس و عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، با توجه به رابطه (۱) برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$\text{میزان جابه‌جایی تسلیم} = (5/03 + 5/03) \div 2 = 5/03$$



شکل ۱۱- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار

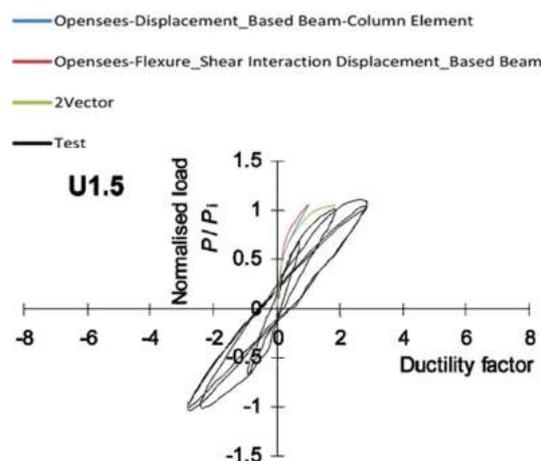
برشی کوتاه می‌باشد، مشاهده شد که مدل تهیه شده با این نرم‌افزار انطباق خوبی با نتایج آزمایشات دارد.

۲- در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اپنسیس، با توجه به مسئله مش‌بندی در ارتفاع عضو پوسته، که نیاز به تعریف تعداد زیادی عضو در ارتفاع و حجم بالای محاسبات دارد؛ استفاده از عضو تیر-ستون (MVLEM و اصلاح شده) در مدل‌سازی دیوار برشی به پوسته ترجیح داده شده است.

۳- در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس و عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش (MVLEM اصلاح شده)، مشاهده شد که نتایج حاصل از مدل‌سازی، انطباق خوبی با نتایج آزمایش دارد. بنابراین، در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه که اندرکنش خمش و برش سهم قابل‌توجهی در محاسبات دارد، مناسب می‌باشد.

۴- با توجه به محدودیت موجود در عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش (MVLEM اصلاح شده)، که فقط قابلیت تحلیل‌های دوبعدی و استاتیکی یکنواخت را دارد، برای انجام تحلیل‌های سه‌بعدی و دینامیکی، عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان (MVLEM)، مورد بررسی قرار گرفت. در فرمول‌بندی این عضو، اندرکنش پاسخ خمشی و برشی در مدل مقطع لحاظ نمی‌شود، ولی با توجه به قابلیت‌های این عضو در تحلیل‌های سه‌بعدی و انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، در بررسی نتایج حاصل از این عضو با نتیجه آزمایش مشاهده شد که این عضو نیز با تفاوت اندک دارای پاسخ مناسبی در مدل‌سازی پاسخ دیوارهای برشی کوتاه می‌باشد. همچنین، با

انطباق کاملی با نتیجه آزمایش دارد. هر دو عضو به‌کار رفته از نرم‌افزار اپنسیس، سختی و مقاومت بزرگ‌تری نسبت به نتیجه آزمایش را تخمین زده‌اند. با افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار در نمونه U1.5 نسبت به نمونه U1 پاسخ‌های به‌دست آمده برای دو عضو در نرم‌افزار اپنسیس به هم نزدیک‌تر شده‌اند.



شکل ۱۴- نمودار برش پایه هم‌پایه شده  $P/P_1$  - ضریب شکل -

$$\Delta/\Delta_y$$

با توجه به اینکه، نمونه U1 دارای نسبت ارتفاع به طول برابر یک و نمونه U1.5 دارای نسبت ارتفاع به طول برابر یک و نیم می‌باشند، به‌منظور بررسی نسبت ارتفاع به طول نمونه کوچک‌تر از ۰/۷، نمونه M3 از آزمایشات گریفن هاگن مورد بررسی قرار گرفت ولی هیچگونه نمودار مناسبی که قابل ارائه در مقاله باشد، حاصل نشد [۱].

## ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به‌منظور پیش‌بینی رفتار دیوارهای برشی کوتاه تحت بارهای جانبی، پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو مقیاس کوچک و بزرگ براساس نتایج آزمایشات، راستی‌آزمایی و معرفی شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان می‌دهد که:

- ۱- با توجه به دقت بالای نرم‌افزارهای اجزای محدود غیرخطی، نرم‌افزار Vector2 دارای دقت بالا در مدل‌سازی عوامل تأثیرگذار در پاسخ دیوارهای

۵- مدل اندرکنش خمشی و برش در شبیه‌سازی افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار در نمونه‌ها مشاهده شد که پاسخ به‌دست آمده برای دو عضو به‌کار رفته در نرم‌افزار اپنسیس به هم نزدیک‌تر می‌شوند.

پاسخ یکنواخت دیوارهای برشی کوتاه با نسبت ارتفاع به طول بزرگ‌تر از ۰/۷ مناسب است.

## مراجع

- [1] Greifenhagen, C. (2006), "Seismic behaviour of lightly reinforced concrete squat shear walls", Doctoral dissertation, Technische Universitat Dresden, Dresden.
- [2] Kuang J. S., & Ho, Y. B. (2008), "Seismic behavior and ductility of squat reinforced concrete shear walls with nonseismic detailing", *ACI Structural Journal*, 105(2), 225-231.
- [3] Dabbagh, H. & Foster, S. J. (2009), "Behavior of High-strength concrete squat shear walls subjected to reversed cyclic loading-an experimental study", 8th International congress on civil engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, May 11-13.
- [4] Choi, C.S. (2006), "Improvement of earthquake-resistant performance of squat shear walls under reversed cyclic loads", *Key engineering materials*, 324-325, 535-538.
- [5] Galal, K. & EL-Sokkary, H. (2008), "Advancement in modeling of RC shear walls". The 14th World Conference on earthquake engineering, Beijing, China, October 12-17.
- [6] Gulec, C.K., & Whittaker, A.S. (2009), "Performance-Based Assessment and Design of squat reinforced concrete shear walls", Technical Report MCEER-09-0010.
- [7] Xiaolei, H., Xuwei, C., Cheang, J., Guiniu, M., & Peifeng, W. (2008), "Numerical analysis of cyclic loading test of shear walls based on OpenSEES", The 14th World Conference on earthquake engineering, Beijing, China.
- [8] Mohamadi Darani, F., & Sarvghad Moghadam, A. (2013), "Finite Element Analysis of Squat Concrete Shear Walls with Rectangular Section under Static Monotonic Loading", *Modares Civil Engineering journal*, 13(3), 113-123.
- [9] Ghanizadeh, M., Sarvghad Moghadam, A., & Farzam, M. (2016), "Effect of the reinforcement patterns on the seismic performance of the short shear walls", *Journal of Modeling in Engineering*, 14(45), 79-92.
- [10] Ghanizadeh, M., Sarvghad Moghadam, A., & Farzam, M. (2017), "Effect of the axial force and material strength on the seismic behavior of the short shear walls", *Journal of Modeling in Engineering*, 15(48), 125-137.
- [11] Moghadam, H., & Baradaran shoraka, M. (2006), "Seismic analysis of squat shear walls with openings", 7th International Congress on Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- [12] Motamedi, B., & Behnamfar, B. (2011), "Investigation of 3D Modeling Methods of RC Shear Walls", 3rd National Conference of Concrete, Tehran, Iran.
- [13] Tehranizadeh, M., Azizzadeh, Sh. (2009), "Comparison of Some Different Modeling Methods of Concrete Shear Wall Structures for Nonlinear Static and Dynamic Analysis", 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran.
- [14] Saghaeian, A., & Nateghi Elahi, F. (2011), "Comparison of different modeling methods in predicting nonlinear behavior of shear walls", *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, 14(3), 11-26.
- [15] Vecchio, F. J., & Wong, P. S. (2002). "Vector2 & Frameworks user's manual", <http://www.civ.utoronto.ca/vector/software.html>
- [16] Mazzoni, S. (2006). "Opensees Command Language Manual", <http://Opensees.Berkeley.edu>.
- [17] Taucer F.F., Spacone E., Filippou F.C. (1991), "A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, Report UCB/EERC-91/17.
- [18] Orakcal, K., Massone, L.M., Wallace, J.W. (2006), "Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flexural Responses", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Los Angeles, Report PEER 2006/07.



## بررسی اثر ارتفاع سازه در دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه‌های فولادی همراه با جداسازهای لاستیکی با هسته سربی

در این تحقیق، بررسی مقایسه‌ای بین روش‌های استاتیکی غیرخطی با روش تاریخچه زمانی برای سازه‌های مهاربندی شده از نوع شورون (به‌همراه جداساز لرزه‌ای لاستیکی با هسته سربی در تراز پایه) انجام شده است. با توجه به تأثیر ارتفاع در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه جداسازی شده در این مقاله، ۳ سازه ساختمانی جداسازی شده با جداساز لاستیکی با هسته سربی در ۳ تراز ارتفاعی مختلف ۴، ۷ و ۱۰ طبقه، در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد با فرض نوع خاک C به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون، با تغییرمکان هدف آیین‌نامه ASCE41-13 و با الگوهایی بار جانبی مود اول سازه، یکنواخت، مثلثی، دینامیکی طیفی و PSC به‌همراه تحلیل تاریخچه زمانی برای رکورد زلزله‌های حوزه دوره انتخابی، بر روی مدل‌های مورد نظر اعمال گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که برآورد جابه‌جایی حداکثر این جداساز و برش پایه در روش‌های بار افزون ASCE41-13، دارای دقت بالایی در سازه‌های با تراز ارتفاعی مختلف بوده‌اند. در برآورد جابه‌جایی حداکثر طبقات، روش‌های مود اول، یکنواخت، دینامیکی طیفی، PSC دارای دقت کافی در تمام ترازهای ارتفاعی مورد بحث بوده و با افزایش ارتفاع سازه، دقت الگوی بار مثلثی کاهش پیدا کرده است و در مقایسه با آن، روش PSC دارای دقت بالایی می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** سازه جداسازی شده، جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB)، روش‌های تحلیل غیرخطی، تأثیر ارتفاع در دقت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون.

برابر زلزله از خود مقاومت نشان می‌دهد. اما در روش‌های جدید و مدرن طراحی سازه‌ها، به‌منظور ایمنی و مقاومت عناصر سازه‌ای در برابر زلزله و از سوی دیگر، اقتصادی نمودن طراحی اعضای سازه‌ای، از سیستم‌های کنترلی بهره می‌برند. امروزه استفاده از سیستم‌های کنترلی به‌منظور جلوگیری از ارتعاشات سازه‌ها در مقابل زلزله بسیار گسترش یافته است. استفاده از سیستم‌های کنترلی در سازه‌ها باعث می‌شود که اعضای سازه‌ای در زمان وقوع زلزله در محدوده ارتجاعی باقی بمانند و از بروز آسیب و تخریب در آن‌ها جلوگیری شود [۱].

### ۱- مقدمه

همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسين عمران، یافتن راه‌حلی مناسب به‌منظور مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله بوده است. در روش‌های معمول و مرسوم طراحی، ساختمان با کاربرد ترکیبی از سختی، قابلیت شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در اجزای اصلی سازه‌ای، در

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۱۰، بازنگری ۱۳۹۸/۰۷/۱۰، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۱۲.  
DOI: 10.22091/cer.2019.4899.1180 شناسه دیجیتال

پدرام حسینی\*

استادیار، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات.

پست الکترونیک:

p.hosseini@mahallat.ac.ir

محمود حسینی

دانشیار، پژوهشکده زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران.

پست الکترونیک:

hosseini@iiees.ac.ir

سید محمد عمرانی‌زاده

کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

پست الکترونیک:

mohammad.omrani68@gmail.com

وسایل جاذب انرژی به صورت‌های مختلفی یافت می‌شود و موجب اتلاف انرژی به صورت مکانیزم‌های مختلفی شامل جاری شدن فولاد، عملکرد ویسکوالاستیک در مواد لاستیک‌گونه، ایجاد برش در مایع ویسکوز، اصطکاک و غیره می‌شود. این سیستم‌ها احتیاج به وسایلی با مشخصات ویژه (سختی، مقاومت، رفتار چرخه‌ای یا هیستریزس و غیره) دارند، به طوری که می‌توان این وسایل را به دو گروه جداسازها و میراگرها تقسیم نمود [۲].

در طول سال‌های گذشته، تکنولوژی ساخت و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، پیشرفت زیادی کرده است. جداسازی لرزه‌ای در واقع نصب سیستمی است که سازه و یا ملحقات آن را از حرکات لرزه‌ای مخرب زمین و یا تکیه‌گاه جدا می‌سازد. این جداسازی با افزایش انعطاف‌پذیری سیستم و نیز تأثیر میرایی مناسب به دست می‌آید [۳].

سازه‌های جداسازی شده به سازه‌هایی گفته می‌شود که از سطح زمین یا سطح زیرین به وسیله جداساز جدا شده‌اند [۴].

از نظر تحلیلی، شتاب حداکثر زلزله‌ها معمولاً دارای زمان تناوب غالبی حدود ۰/۱ تا ۱ ثانیه بوده و حداکثر شدت آن در محدوده ۰/۲ تا ۰/۶ ثانیه می‌باشد. بنابراین چون امکان تشدید پاسخ‌هایی که زمان تناوب طبیعی آنها در محدوده ۰/۱ تا ۱ ثانیه است در مقابل زلزله وجود دارد؛ این سازه‌ها در محدوده‌های تناوبی فوق، آسیب‌پذیرترند. بهترین امتیاز جداسازهای ارتعاشی در این است که با انعطاف‌پذیری زیاد خود زمان تناوب طبیعی سازه را افزایش می‌دهند. این پدیده یعنی افزایش زمان تناوب سازه، موجب می‌گردد که از تشدید سازه و یا نزدیک شدن به حالت تشدید اجتناب شود و در نهایت پاسخ سازه کاهش یابد. افزایش تناوب سبب کاهش میزان شتاب پاسخ سازه می‌گردد. از طرفی، افزایش زمان تناوب و در نتیجه افزایش انعطاف‌پذیری بر میزان تغییرمکان افقی اثر می‌گذارد. در زلزله‌های بزرگ، مقدار حداکثر تغییرمکان یک سازه بدون میرایی که در آن از

جداسازهای ارتعاشی استفاده می‌شود، می‌تواند به حدود ۱ متر برسد اما وجود میرایی می‌تواند این تغییرمکان را به ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر کاهش دهد. علی‌رغم وجود روش‌های متفاوت برای طراحان، همه روش‌ها چنین تغییرمکانی را (تغییرمکان حدود ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر) منطقی می‌دانند. این مقادیر در صورت تحریکات شدید زلزله تا حدود ۲ برابر نیز معقول خواهد بود. این نکته نیز حائز اهمیت است که برای تمام سازه‌هایی که دارای سامانه جداساز ارتعاشی می‌باشند، باید درز زلزله مناسبی تعبیه شود تا تغییرمکان‌های بزرگ را در طول زلزله امکان‌پذیر نماید. از اینرو سیستم‌های جداساز، روشی برای محافظت ساختمان‌ها در برابر خسارات ناشی از زلزله بوده و این عمل با محدود ساختن اثر تخریبی زلزله و نه مقاوم کردن سازه در مقابل زلزله انجام می‌پذیرد [۵].

نهایتاً به طور خلاصه می‌توان نحوه عملکرد سازه جداسازی شده را بدین شرح عنوان نمود که در اثر افزایش انعطاف‌پذیری بر سازه، با افزایش زمان تناوب و میرایی، شتاب پاسخ لرزه‌ای کم می‌شود. همچنین افزایش زمان تناوب، تغییرمکان کلی سازه جداسازی شده را افزایش می‌دهد؛ اما افزایش میرایی تا حد زیادی این موضوع را جبران می‌کند [۶].

افزایش ارتفاع ساختمان در حالت کلی متناظر با افزایش دوره تناوب طبیعی آن است. باید توجه نمود که در جداسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها با نزدیک شدن دوره تناوب موده‌های ارتعاشی در سازه بدون جداساز لرزه‌ای به مود ارتعاشی سازه جداسازی شده، تأثیر روش جداسازی لرزه‌ای کاهش می‌یابد [۷].

دوره تناوب طبیعی سازه روی سامانه جداساز با فرض پایه گیردار تابعی از ارتفاع، جنس سازه، سیستم سازه‌ای و شکل سازه است. از نظر مفهومی، در حالت ایده‌آل، سازه جداسازی شده، یک سامانه یک درجه آزاد با یک جرم صلب بر روی یک فنر در نظر گرفته می‌شود [۸].

در بخش پیش‌رو مقدمه ارائه شده است. در بخش بعدی، مدل‌سازی سازه جداسازی شده بیان شده است. در بخش سوم، مثال‌های عددی و در آخرین بخش، بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲- مدل‌سازی سازه جداسازی شده

در روش طراحی براساس عملکرد برای تعیین عملکرد و ارزیابی سازه و اجزای آن نیاز به تعیین ظرفیت و نیاز لرزه‌ای سازه می‌باشد. برای دستیابی به این هدف باید از روش‌های تحلیلی استفاده شود که بتوانند رفتار سازه و اجزای آن و همچنین حرکات ناشی از زمین‌لرزه را به خوبی مدل کنند. روش‌های تحلیلی که پیشنهاد شده‌اند به‌طور کلی به دو دسته خطی و غیرخطی که هر کدام به صورت استاتیکی یا دینامیکی انجام می‌گیرند، تقسیم می‌شوند. در روش تحلیل استاتیکی خطی رفتار مصالح خطی است و برخلاف آنکه نیروهای ناشی از زلزله دینامیکی است؛ اما اثر آن بر روی سازه با اعمال بار معادل استاتیکی برآورد می‌گردد [۱۲].

در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون، یک سازه تحت بار جانبی قرار می‌گیرد و این بار به‌طور افزایشی به سازه اعمال می‌شود، تا سازه در نقطه کنترل (که معمولاً بام می‌باشد) به تغییرمکان از پیش تعیین شده‌ای که به آن تغییرمکان هدف گفته می‌شود برسد. سپس در این تغییرمکان، پاسخ‌های سازه از جمله تغییرمکان حداکثر طبقات، نسبت تغییرمکان نسبی طبقات، تنش‌های اعضا و معیار خرابی، ثبت می‌شود [۱۳].

در تحلیل‌های غیرخطی، تحلیل سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی اجزای سازه، به کمک تعریف رفتار غیرخطی مصالح، انجام می‌شود. در روش‌های تحلیل غیرخطی، مفصل پلاستیک در نقاط حداکثر لنگرهای ناشی از بارهای ثقلی و جانبی پیش‌بینی شده و تحلیل مدل سازه بر این اساس انجام می‌شود. یکی از روش‌های

سیستم جداساز لرزه ای  $LRB^1$  شامل یک هسته سربی است که در داخل جداساز لاستیکی محصور شده است. جداسازهای لاستیکی به تنهایی قادر به تأمین میرایی زیاد و جذب انرژی مناسب نیستند. هسته سربی در جداسازهای لاستیکی با تسلیم شدن در زمان ارتعاش، میزان میرایی را از حدود ۳ درصد میرایی بحرانی در جداسازهای لاستیکی به چیزی حدود بیش از ۱۰ درصد افزایش می‌دهند. همچنین هسته سربی با تأمین سختی اولیه کافی، سازه جداسازی شده را در برابر بارهای جانبی ضعیف مانند باد یا زلزله‌های ضعیف مقاوم می‌کند [۹].

جداساز لاستیکی با هسته سربی با نمایش رفتاری دو خطی با نرم‌شدگی تحت بارهای نسبتاً شدید لرزه‌ای، عملکرد مطلوبی در زمینه کنترل توأم لرزه‌های خفیف و شدید از خود نشان داده‌اند [۱۰]. لازم به ذکر است تغییر جابه‌جایی و سرعت زیاد پالس‌های رکورد زلزله در حوزه نزدیک در رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده بسیار مهم است [۱۱].

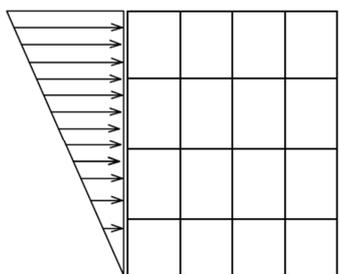
ارتفاع از جمله پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد رفتاری سازه جداسازی شده می‌باشد و طبق بررسی‌های انجام گرفته در پژوهش‌های پیشین، با تحقیقی مشابه در زمینه تأثیر ارتفاع، در تعیین دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه‌های جداسازی شده با جداسازهای لاستیکی با هسته سربی برخورد نشده است. لذا با توجه به جدید بودن موضوع، در این مطالعه با استفاده از مطالعات پیشین که از نظر ماهوی در چارچوب این مطالعه قرار دارند و با نگاهی تازه، از زاویه جدیدی به موضوع نگریسته شده است. با بررسی جامعی در مورد روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی و نوآوری‌های جدید به وجود آمده در این روش‌ها، به ارزیابی تأثیر ارتفاع در تعیین دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه‌های جداسازی شده با جداسازهای  $LRB$  پرداخته شده است.

<sup>1</sup>- Lead Rubber Bearing

$$T > 2/5s \Rightarrow k = 2/0 \quad (2)$$

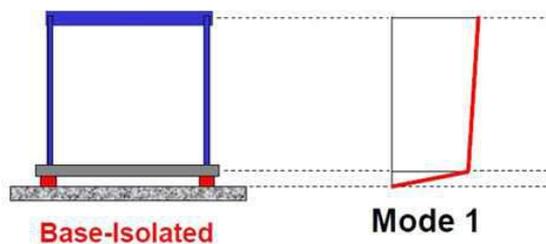
$$T \leq 2/5s \Rightarrow k = 1/0$$

در مورد سازه‌ی جداسازی شده براساس FEMA273، ضریب  $k$  برابر یک در نظر گرفته شده است [۱۵].



شکل ۱- توزیع بار جانبی متناسب با تحلیل استاتیکی خطی سازه

۲- توزیع بار جانبی متناسب با شکل مود اصلی: این الگوی بار، زمانی استفاده می‌شود که بیشتر از ۷۵٪ جرم مجموع در مود اصلی مشارکت دارند. تصویر این توزیع در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- توزیع بار جانبی متناسب با مود اصلی سازه جداسازی شده

۳- توزیع بار جانبی یکنواخت: شامل نیروهای جانبی در هر طبقه متناسب با جرم مجموع در هر طبقه سازه مطابق رابطه (۳) می‌باشد.

$$F_x = \frac{W_x}{\sum W_x} V \quad (3)$$

۴- توزیع بار جانبی متناسب با بار جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی خطی طیفی (شامل مودهای کافی که جمع جرم مؤثر آنها بیش از ۹۰٪ جرم کل سازه است).

تحلیل دینامیکی غیرخطی، روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی است که دارای دقت بالایی می‌باشد. با این حال، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی بسیار وقت‌گیر بوده که نیاز به در نظر گرفتن مجموعه‌ای از تحریک‌های زمین می‌باشد و در مجموع پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. در مقابل، روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌توانند گزینه مناسبی جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها محسوب شوند. این روش‌ها به‌عنوان ابزاری مناسب و کاربردی در تحلیل سازه‌ها در علوم مهندسی سازه و زلزله، توسعه فراوانی پیدا کرده‌اند.

## ۲-۱- الگوهای توزیع بار جانبی

نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون به‌طور قابل توجهی به توزیع بار جانبی بستگی دارد. الگوهای توزیع بار جانبی متفاوت برای به‌دست آوردن منحنی ظرفیت سازه در دو نوع به شرح زیر است:

### الف) توزیع نوع اول بار جانبی

به‌عنوان توزیع نوع اول، باید بار جانبی با یکی از چهار روش زیر مطابق تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون براساس آیین‌نامه ASCE41-13 و دستورالعمل FEMA-356 محاسبه و بر مدل سازه اعمال شود [۱۴]:

۱- توزیع بار جانبی متناسب با روش استاتیکی خطی: این الگوی بار، زمانی استفاده می‌شود که بیشتر از ۷۵٪ جرم مجموع در مود اصلی مشارکت دارند. تصویر این توزیع مطابق رابطه (۱) در شکل ۱ ارائه شده است.

$$FV_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{x=1}^n w_x h_x^k} V \quad (1)$$

در رابطه فوق  $h_x$  ارتفاع سازه در طبقه  $x$ ام و  $w_x$  وزن طبقه در تراز  $x$  می‌باشد. ضریب  $k$  به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد. لازم به ذکر است در رابطه زیر،  $T$ ، زمان تناوب تجربی سازه می‌باشد.

(کف اول روی سامانه جداساز) که متناسب با وزن مؤثر لرزه‌ای کف اول که تغییرمکان یکسان با سامانه جداساز را دارد، می‌باشند. این نیرو به صورت جداگانه از رابطه (۴) در تحلیل PSC به کف اول سازه اعمال می‌شود.

#### ۲-۲- انتخاب زمان تناوب مؤثر ساختمان جداسازی شده

جهت طراحی ساختمان در حالت جداسازی شده با سیستم جداساز لرزه‌ای، ابتدا یک زمان تناوب مؤثر برای ساختمان فرض شده است. زمان تناوب فرض شده برای ساختمان جداسازی شده باید رابطه (۷) را فراهم کند.

$$\text{Max}(3T_{\text{Fix}}, 1.5) < T_D < 3\text{sec} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، پارامتر  $T_D$  برابر با زمان تناوب مؤثر ساختمان جداسازی شده در تغییرمکان طرح (زمان تناوب طبیعی هدف) می‌باشد.

#### ۲-۳- محاسبه تغییرمکان طرح ساختمان جداسازی شده

سامانه جداساز برای تحمل حداقل تغییرمکان جانبی زلزله در دو امتداد اصلی سازه طبق رابطه (۸) طراحی و ساخته می‌شود.

$$D_D = \frac{gS_{D_1}T_D}{4\pi^2B_D} \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $D_D$  تغییرمکان طرح،  $S_{D_1}$  شتاب طیفی در زمان تناوب یک ثانیه برای زلزله طرح آیین‌نامه،  $B_D$  ضریب میرایی برای سامانه جداسازی شده و  $g$  شتاب گرانش زمین در واحد متریک در نظر گرفته شده‌اند.

#### ۲-۴- محاسبه تغییرمکان هدف ساختمان جداسازی شده

در مورد سازه‌های جداسازی شده، تغییرمکان هدف براساس استاندارد های FEMA-273 و FEMA-356 و همچنین آیین‌نامه ASCE 41-13 (نسخه سال ۲۰۱۴)

(ب) الگوی توزیع بار جانبی نوع دوم به روش PSC در حالی که توزیع بار مثلثی وارون، یک توزیع عمومی مورد استفاده در کلیه سازه‌ها است؛ این توزیع برای سازه‌ها با جداساز لرزه‌ای مناسب نیست. دلیل اصلی این موضوع آن است که نیروی جانبی در تراز پایه برابر صفر است، در حالی که به دلیل وجود همیشگی اینرسی در تراز پایه در سازه‌هایی با جداساز لرزه‌ای، باید نیروی جانبی غیر صفر در این تراز، در نظر گرفته شود [۱۶].

با توجه به مسأله در نظر گرفتن اینرسی در تراز پایه، کمیته سازمان حمایتی (PSC<sup>۱</sup>) جامعه مهندسين سازه کالیفرنیا (SEAONC<sup>۲</sup>)، یک توزیع بار جانبی مثلثی معکوسی در راستای ارتفاع سازه برای رو سازه به همراه یک بار متمرکز جانبی در تراز پایه پیشنهاد داده است [۱۶].

برای اعمال توزیع بار جانبی به روش PSC، ضریب  $k$  طبق آیین‌نامه ASCE7-05 در روابط (۴) تا (۶) ارائه شده است [۱۷].

$$F_i = \frac{(V_b - F_b)}{R} \frac{W_i h_i^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \quad (4)$$

$$V_b = K_{\text{eff}} D_b \quad (5)$$

$$F_b = \frac{V_b}{W} W_b \quad (6)$$

در روابط فوق،  $W$  برابر با وزن مؤثر لرزه‌ای کل ساختمان،  $W_b$  وزن کف اول روی سامانه جداساز،  $R$  ضریب رفتار سازه جداسازی شده،  $K_{\text{eff}}$  برابر سختی مؤثر سامانه جداسازی شده (مجموع سختی جداسازها)،  $D_b$  تغییرمکان طراحی سامانه جداساز،  $F_i$  نیروی جانبی وارد بر طبقات سازه جداسازی شده در تحلیل استاتیکی غیرخطی PSC و  $F_b$  یک بار متمرکز جانبی در تراز پایه

<sup>1</sup> - Protective Systems Committee

<sup>2</sup> - Structural Engineers Association of Northern California

طرح، C ضریب نیروی زلزله،  $V_s$  نیروی جانبی لرزه‌ای ساختمان و  $V_b$  نیروی جانبی لرزه‌ای قابل تحمل برای سامانه جداساز می‌باشند. لازم به ذکر است  $V_s$  در ارتفاع سازه واقع در بالای سامانه جداساز طبق رابطه (۱) توزیع شده است.

## ۷-۲- تعیین خصوصیات منحنی دو خطی نیرو -

### تغییر مکان سامانه جداساز

خصوصیات منحنی نیرو - تغییر مکان سامانه جداساز با کمک روابط زیر به دست می‌آید.

$$Q = \frac{2 \times k_{\text{eff}} D_D^2 \times k_{\text{eff}}}{4(D_D - D_y)} \quad (12)$$

$$K_P = k_{\text{eff}} - \frac{Q}{D_D} \quad (13)$$

$$D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2} \quad (14)$$

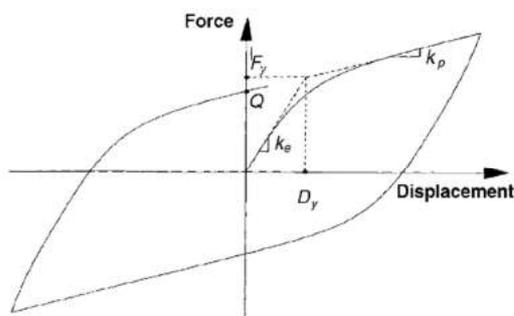
$$k_1 = 1.0 \cdot k_2 \quad (15)$$

$$k_2 \geq 1.5 \cdot k_{\text{eff}} \quad (16)$$

که در روابط فوق،  $k_{\text{eff}}$  سختی مؤثر سیستم جداساز،  $k_1$  سختی اولیه سیستم جداساز،  $k_2$  سختی پس از تسلیم،  $k_v$  سختی قائم سیستم جداساز، Q مقاومت مشخصه سیستم جداساز،  $F_y$  مقاومت تسلیم سیستم جداساز،  $D_y$  تغییر مکان حد تسلیم سیستم جداساز می‌باشند.

شکل ۳ منحنی رفتار دوخطی سامانه جداسازی

لرزه‌ای LRB را مطابق با آیین‌نامه ASCE41-13,2014 نمایش می‌دهد.



شکل ۳- منحنی رفتار دوخطی سامانه جداساز لرزه‌ای LRB

[۱۸] (ASCE41-13, 2014)

[۱۸] مطابق رابطه (۹) ارائه شده است. سطح عملکرد و پاسخ‌های سازه تا آن مقدار تغییر مکان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left[ \frac{T_e}{T_D} \right]^2}} \quad (9)$$

در رابطه (۹) مقدار  $D_D'$  تغییر مکان هدف در مرکز جرم اولین کف واقع روی سامانه جداساز در واحد متریک جهت تحلیل بار افزون بر اساس آیین‌نامه ASCE41-13 می‌باشد. همچنین مقدار  $T_e$  برابر با زمان تناوب اصلی مؤثر سازه فوقانی روی سامانه جداساز با فرض پایه‌گیردار می‌باشد.

## ۵-۲- محاسبه سختی مؤثر سامانه جداساز در

### تغییر مکان طراحی

نحوه محاسبه سختی مؤثر مطابق رابطه (۱۰)

محاسبه می‌شود.

$$k_{\text{eff}} = \frac{W}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \quad (10)$$

$$\frac{k_{\text{eff}}}{n} = (k_{\text{eff}})_{\text{one Isolation}}$$

در رابطه فوق، n تعداد جداسازها در هر ساختمان در نظر گرفته شده است.

## ۶-۲- نیروی جانبی اجزای سازه‌ای واقع در بالای سامانه

### جداساز

نیروی جانبی لرزه‌ای قابل تحمل برای سامانه جداساز مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$V_b = k_{\text{eff}} D_D$$

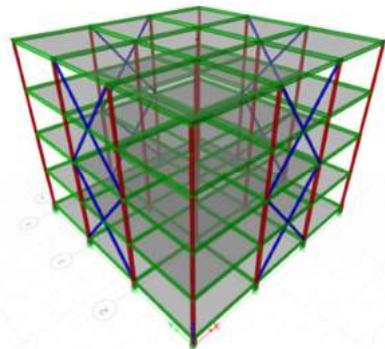
$$V_s = \frac{k_{\text{eff}} D_D}{R_I} \quad (11)$$

$$V_s = C.W$$

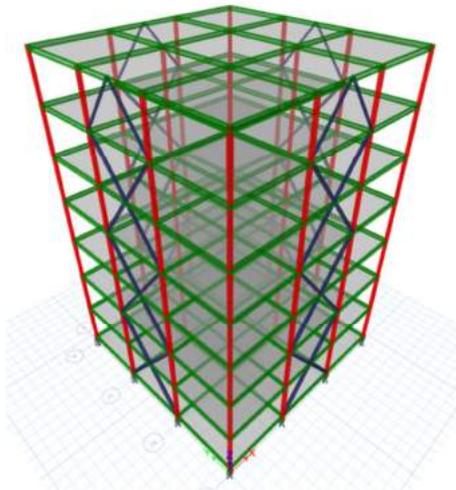
که در رابطه فوق،  $R_I$  ضریب رفتار ساختمان جداسازی شده،  $k_{\text{eff}}$  سختی مؤثر سیستم جداساز در تغییر مکان

جدول ۱- مشخصات مصالح

مقدار	مصالح
$2/0.3 \times 10^{10}$ $\text{kgf/m}^2$	مدول الاستیسیته
۰/۳	ضریب پواسون
$7850 \text{ kgf/m}^2$	ورن واحد سطح
$24000000 \text{ kgf/m}^2$	تنش تسلیم
$37000000 \text{ kgf/m}^2$	تنش گسیختگی
۱/۵	نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم حداقل فولاد



شکل ۴- سازه ۴ طبقه



شکل ۵- سازه ۷ طبقه

طراحی اسکلت فلزی ساختمان‌های جداسازی شده با جداساز لرزه‌ای LRB، براساس آیین‌نامه AISC-360-10 و به روش LRFD<sup>۴</sup> انجام شده است. بارهای ثقلی اعمالی به

### ۳- مثال‌های عددی

ساختمان‌های مورد مطالعه در این پژوهش، ۳ ساختمان از نوع فولادی منظم، با پلان مربعی با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی متوسط با مهاربند هم‌محور فولادی (شورون) ویژه در دو جهت است که توسط سیستم جداساز لرزه‌ای پایه LRB از سطح پی سازه جداسازی شده‌اند. ساختمان‌ها در سه تراز ۴ (شکل ۴) و ۷ (شکل ۵) و ۱۰ طبقه با تعداد ۳ دهانه قاب در دو جهت با طول دهانه ۵ متر (ابعاد پلان ۱۵×۱۵) و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. محل احداث سازه ساختمان‌ها در شهر سانفرانسیسکو ایالات متحده آمریکا با کاربری اداری می‌باشند. خاک منطقه از نوع C (خاک نوع II آیین‌نامه ۲۸۰۰) می‌باشد و در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی زیاد قرار دارند. قاب‌های پیرامونی سازه ساختمان‌ها از نوع سیستم دوگانه ذکر شده در فوق و قاب‌های داخلی، خمشی متوسط فولادی می‌باشد. در طراحی ستون‌ها و مهاربندها از مقاطع قوطی‌شکل و در تیرها از مقاطع IPE استفاده شده است. ابتدا سازه ساختمان‌ها در حالت پایه گیردار مدل‌سازی شده است و بعد از استخراج وزن مؤثر لرزه‌ای ساختمان‌ها، در حالت جداسازی شده با جداساز لرزه‌ای LRB و با ضریب رفتار جدید ( $R=2$ ) که ضریب رفتار مناسب ساختمان جداسازی شده مطابق آیین‌نامه ASCE07-10 می‌باشد، طراحی شده است. لازم به ذکر است کف اول ساختمان دارای ارتفاع ۰/۸ متر از تراز زمین ساختمان بوده و ارتفاع تمامی سیستم‌های جداسازی ۰/۴ متر از تراز روی زمین در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح مطابق جدول ۱ می‌باشد. همچنین تمامی مقاطع مورد استفاده در جدول پیوست ارائه شده است.

بارگذاری ثقلی براساس آیین‌نامه ASCE07-10 انجام شده است. از طرفی، طراحی سیستم جداساز لرزه‌ای LRB براساس ضوابط مشترک در آیین‌نامه ASCE07-10 و FEMA-451 انجام شده است.

<sup>4</sup>- Load and Resistance Factor Design

جداسازی شده با توجه به آیین‌نامه ASCE07-10 می‌باشد.

ساختمان براساس آیین‌نامه ASCE07 مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات سامانه جداساز

مقدار	نوع بار
٪۱۰۰	حداکثر تغییرشکل نسبی برشی سیستم جداسازی ( $\gamma_{max}$ )
٪۱۵	میرایی مؤثر سیستم جداساز ( $\zeta_{eff}$ )
۱/۳۵	ضریب میرایی برای سیستم جداسازی شده ( $B_D$ )

جدول ۲- مشخصات مصالح

مقدار	نوع بار
۴۵۰ kgf/m <sup>2</sup>	بار مرده طبقات
۲۴۰ kgf/m <sup>2</sup>	بار زنده طبقات
۱۰۰ kgf/m <sup>2</sup>	بار زنده تیغه جداکننده
۵۵۰ kgf/m <sup>2</sup>	بار مرده پشت بام
۱۰۰ kgf/m <sup>2</sup>	بار زنده پشت بام
۶۸۰ kgf/m	بار مرده دیوارهای پیرامونی پشت بام
۳۰۰ kgf/m	بار مرده دیوارهای جان‌پناه پشت بام

لازم به ذکر است، در این پژوهش با توجه به دستورالعمل FEMA-451، زمان تناوب مؤثر هدف سازه جداسازی شده ۲/۵ ثانیه فرض شده است. زمان تناوب تحلیلی به‌دست آمده از نرم‌افزار در سازه ساختمان‌های مورد پژوهش در حالت پایه ثابت ( $T_{Fix}$ ) و جداسازی شده ( $T_{ETABS}$ ) با فرض میرایی ۰/۰۵ ثانیه برای طراحی سامانه جداساز و زمان تناوب مؤثر در تغییرمکان طرح برابر با ۲/۵ ثانیه در جدول ۴ ارائه شده است.

بارگذاری لرزه‌ای سازه‌های مورد بررسی مطابق آیین‌نامه ASCE07-10 انجام شده است، با این فرض که ضریب اهمیت ساختمان و ضریب رفتار ساختمان در حالت پایه گیردار به ترتیب برابر با ۱ و ۶ باشند. مشخصات سامانه جداساز در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول،  $B_D$  ضریب میرایی برای سیستم

جدول ۴- زمان تناوب سازه‌های مورد پژوهش در حالت جداسازی شده و پایه ثابت

نوع	تعداد طبقات	ارتفاع ساختمان (m)	تعداد جداساز	W (kgf)	$T_D$ (S)	$T_{ETABS}$ (S)	$T_{Fix}$ (S)	$\xi$ (%)
LRB1	۴	۱۳/۶	۱۶	۹۲۶۱۴۴	۲/۵	۲/۵۱	۰/۶۵	۱۵
LRB2	۷	۲۳/۲	۱۶	۱۴۶۳۵۳۸	۲/۵	۲/۵۶	۱/۰۱۷	۱۵
LRB3	۱۰	۳۲/۸	۱۶	۲۰۳۴۹۱۷	۲/۵	۲/۷۷	۱/۴۷	۱۵

در جدول ۵ نیروی برش پایه و ضریب نیروی زلزله محاسبه شده برای سازه‌های جداسازی شده براساس روابط (۱۱) ارائه شده است.

همچنین مقدار تغییرمکان طرح ( $D_D$ ) مطابق رابطه (۸) برابر ۰/۳۵۸ متر محاسبه شده است (مقدار  $S_{DI}$  برابر ۰/۷۸ در نظر گرفته شده است).

جدول ۵- نیروی جانبی لرزه‌ای (برش پایه) طراحی سازه ساختمان‌های مورد پژوهش

نوع	تعداد طبقات	ارتفاع ساختمان (m)	تعداد جداساز	W (kgf)	$T_D$ (S)	$V_b$ (kgf)	$V_s$ (kgf)	C
LRB1	۴	۱۳/۶	۱۶	۹۲۶۱۴۴	۲/۵	۲۱۳۰۱۲	۱۰۶۵۰۶	۰/۱۱۵
LRB2	۷	۲۳/۲	۱۶	۱۴۶۳۵۳۸	۲/۵	۳۳۸۳۰۶	۱۶۸۳۰۶	۰/۱۱۵
LRB3	۱۰	۳۲/۸	۱۶	۲۰۳۴۹۱۷	۲/۵	۲۳۴۰۱۵	۲۳۴۰۱۵	۰/۱۱۵

پارامترهای منحنی دوخطی سامانه‌های جداساز در ساختمان‌های مورد پژوهش با کمک روابط (۱۰) و (۱۲) تا

(۱۶) در جدول ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶- پارامترهای منحنی دو خطی سامانه‌های جداساز در ساختمان‌های مورد پژوهش

تغییر مکان حد تسلیم جداساز $D_v$ (m)	مقاومت تسلیم جداساز $F_v$ (kgf)	مقاومت مشخصه جداساز $Q$ (kgf)	سختی مؤثر یک جداساز $K_{eff}(\text{one LRB})$ (kgf/m)	سختی قائم جداساز $k_v$ (kgf/m)	سختی مؤثر جداساز $k_{eff}$ (kgf/m)	سختی ثانویه $k_{PL}$ (kgf/m)	سختی اولیه $k_{el}$ (kgf/m)	نوع
۰/۰۱۵	۳۷۰۳	۳۳۸۲	۳۸۴۴۳	۵۷۶۶۴۵۰	۶۱۵۰۸۸	۲۹۰۶۱	۲۹۰۶۱۹	LRB1
۰/۰۱۵	۵۶۳۶	۵۱۱۴	۵۱۱۲۳	۸۷۱۸۴۵۰	۹۲۹۹۶۸	۴۳۸۴۷	۴۳۸۴۷۷	LRB2
۰/۰۱۵	۸۰۱۰	۷۲۶۸	۸۲۵۹۷	۱۲۳۸۶۵۵۰	۱۳۲۱۵۵۲	۶۲۴۰۶	۶۲۴۰۶۶	LRB3

انتخاب شده مطابق با استاندارد ASCE07-10 مقیاس شده‌اند و سپس برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی به کار گرفته شده‌اند.

لازم به ذکر است که در سازه‌های جداسازی شده براساس استاندارد ASCE07-10 بجای محدوده زمان تناوب  $0.7T$  تا  $1.5T$  از محدوده  $0.5TD$  تا  $1.25TD$  استفاده شده است که  $T$  زمان تناوب تجربی ساختمان باتوجه به رابطه تجربی آیین‌نامه می‌باشد. ضریب مقیاس حاصل شده برای هر زلزله را در تمام مؤلفه‌های افقی زلزله ضرب نموده و زلزله‌های انتخاب شده مطابق با طیف طرح استاندارد ASCE07-10 برای خاک نوع C مقیاس شدند. در جدول ۷، نام و مشخصات هفت رکورد زلزله‌های انتخابی، آمده است. مدت زمان مؤثر زلزله در این جدول، مربوط به متوسط دو مؤلفه افقی هر زلزله می‌باشد. ضرایب مقیاس به دست آمده برای شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده در جدول ۸ ارائه شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است طیف‌های مقیاس شده زلزله‌های انتخاب شده در محدوده‌ی  $0.5TD$  تا  $1.25TD$  بالاتر از طیف طرح آیین‌نامه ASCE07-10 قرار گرفته‌اند.

در شکل ۷ یک نمونه از رفتار غیرخطی المان جداساز در تحلیل تاریخیچه زمانی در نرم‌افزار ETABS نمایش داده شده است.

به منظور دریافت خصوصیات رفتاری و تعیین مقاطع سازه‌ای، باید یک ساختمان مورد مدل‌سازی، تحلیل و طراحی قرار گیرد. برای همین منظور در این پژوهش، از نرم‌افزار ETABS2015 استفاده شده است. جهت مدل‌سازی سامانه جداساز LRB از المان Link از نوع Rubber Isolator با رفتار دوخطی که مخصوص مدل‌سازی سامانه‌های جداساز در نرم‌افزار ETABS می‌باشد، استفاده شده است. به منظور تحلیل غیرخطی در نرم‌افزار ETABS، مفاصل پلاستیک تیرها و ستون‌ها و مهاربندها اختصاص داده شده است. با توجه به مجهز بودن نرم‌افزار ETABS در نسخه ۲۰۱۵ به آیین‌نامه بهسازی ASCE41-13 در تعریف شامل پلاستیک، از مفاصل خودکار استفاده شده است. در این پژوهش برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز برای تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی از ضمیمه A آیین‌نامه FEMA695 [۱۹] استفاده شده است. در نهایت، یک دسته رکورد در حوزه دور با توجه به معیارهای توضیح داده شده در FEMA695 انتخاب شده است. قابل ذکر است که در این آیین‌نامه، رکوردها براساس رکوردهای موجود در پایگاه داده مرسوم به PEER داده شده‌اند.

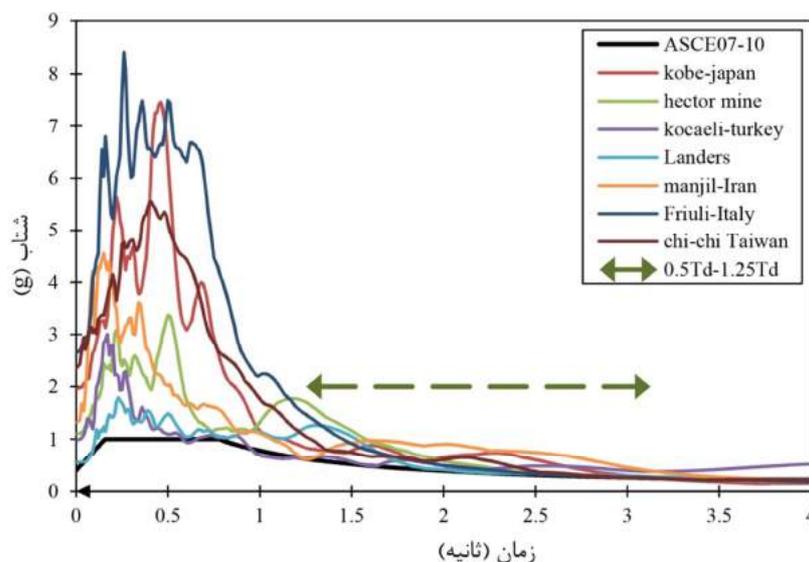
مقدار  $T_D$  زمان تناوب مؤثر طراحی جداساز لرزه‌ای در سطح خط ۱، براساس دستورالعمل FEMA-451 برابر  $2/5$  ثانیه در نظر گرفته شده است. تمامی زلزله‌های

جدول ۷- مشخصه‌های زلزله‌های انتخاب شده در حوزه دور

ID	۱	۳	۳	۴	۵	۶	۷
نام	Kobe Japan	Kocaeli Turkey	Hector Mine	Manjil Iran	Chi-Chi Taiwan	Friuli Italy	Landers
RSN	۱۱۱۱	۱۱۴۸	۱۷۸۷	۱۶۳۳	۱۴۸۵	۱۲۵	۹۰۰
سال	۱۹۹۵	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱۹۹۰	۱۹۹۹	۱۹۷۶	۱۹۹۲
ایستگاه	Nishi-Akashi	Arcelik	Hector	Abbar	TCU045	Tolmezo	Yermo Fire
NEHRP	C	C	C	C	C	C	D
(Vs) 30	۶۰۹	۵۲۳	۶۸۵	۷۲۴	۷۰۵	۴۲۵	۳۵۴
Site source Distance	۷/۱	۱۳/۵	۱۱/۷	۱۲/۶	۲۶	۱۵/۸	۲۳/۶
PGA (g)	۰/۵۱	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۳۵	۰/۲۴
Magnitude	۶/۹	۷/۵	۷/۱	۷/۴	۷/۶	۶/۵	۷/۳
T Arias (s)	۱۰/۴۶	۹/۸۶۵	۱۰/۶۴	۲۸/۹	۱۱/۲۵	۴/۵۳	۱۸/۰۹

جدول ۸- ضرایب مقیاس به دست آمده برای شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده

ID	۱	۳	۳	۴	۵	۶	۷
نام	Kobe Japan	Kocaeli Turkey	Hector Mine	Manjil Iran	Chi-Chi Taiwan	Friuli Italy	Landers
ضریب مقیاس	۱/۳۸۷	۰/۶۹۷	۰/۷۲۸	۰/۹۳۶	۱/۶۶۲	۱/۸۶۶	۰/۳۹۴



شکل ۶- نمودار مقایسه طیف مقیاس شده زلزله‌های انتخاب شده با طیف طرح آیین‌نامه ASCE07-10

۳- الگوی بار جانبی متناسب با بار جانبی حاصل از

تحلیل دینامیکی خطی طیفی

۴- الگوی بار جانبی یکنواخت متناسب با وزن هر

طبقه ساختمان

۵- الگوی بار جانبی مثلثی معکوس با بار اضافی در

تراز کف اول سازه به روش PSC

در سازه‌های جداسازی شده مورد تحقیق، تحلیل

استاتیکی غیرخطی بار افزون براساس تغییرمکان هدف

آیین‌نامه ASCE41-13 با پنج الگوی بار جانبی متفاوت به

شرح زیر انجام شده است:

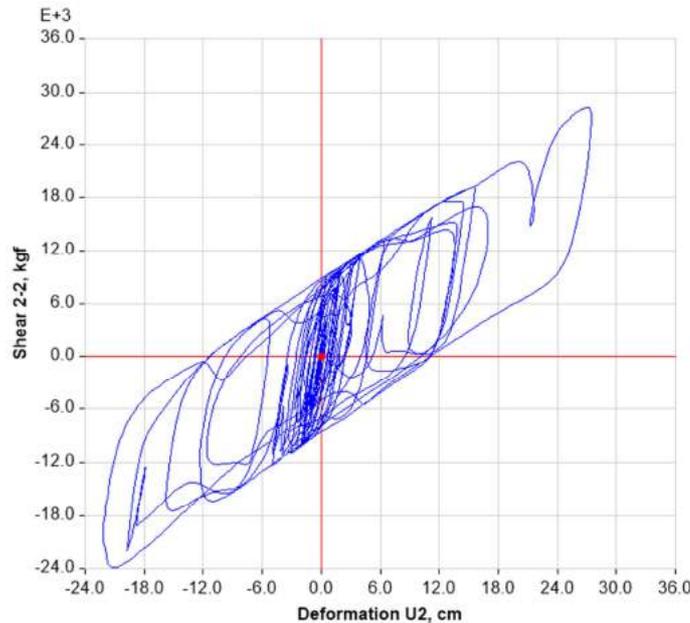
۱- الگوی بار جانبی مثلثی معکوس متناسب با بار

جانبی حاصل از تحلیل استاتیکی خطی معادل

۲- الگوی بار جانبی متناسب با شکل مود اصلی سازه

FEMA-356 و همچنین ASCE41-13 می‌باشد که در جدول ۹ ارائه شده است.

همان طور که در رابطه (۹) به آن اشاره شده است، تغییر مکان هدف در مرکز جرم اولین کف واقع بر روی سامانه جداساز براساس آیین‌نامه‌های FEMA-273.



شکل ۷- نمودار هیستریزیس المان جداساز LRB در نرم‌افزار در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی زلزله Chi-chi

جدول ۹- محاسبه تغییر مکان هدف تحلیل‌های بار افزون براساس آیین‌نامه ASCE41-13

$D_D$ (سانتیمتر)	$D_D$ (سانتیمتر)	$T_{Fix}$ (ثانیه)	$T_D$ (ثانیه)	تعداد جداساز	ارتفاع ساختمان (متر)	تعداد دهانه	تعداد طبقات
۳۴/۸	۳۵/۸	۰/۶۵	۲/۵	۱۶	۱۳/۶	۳	۴
۳۳/۱	۳۵/۸	۱/۰۱	۲/۵	۱۶	۲۳/۲	۳	۷
۳۰/۸	۳۵/۸	۱/۴۷	۲/۵	۱۶	۳۲/۸	۳	۱۰

دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی معیار دقت سایر روش‌ها قرار گرفته است. در نمودارهای شکل ۸، حداکثر تغییر مکان طبقات و کف اول روی سامانه جداساز (جابه‌جایی جداساز LRB) برای سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه ارائه شده است. لازم به ذکر است، منظور از طبقه صفر، همان کف اول روی جداساز می‌باشد.

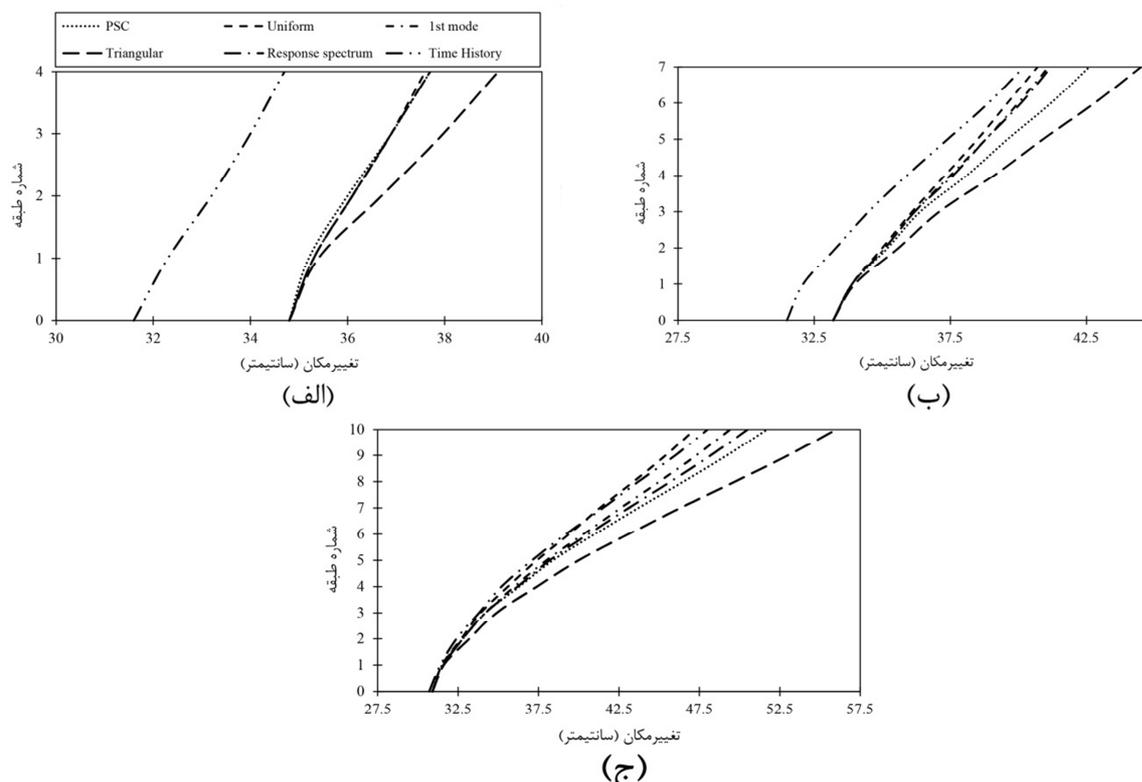
با توجه به شکل ۸، جابه‌جایی طبقات و سامانه جداساز لرزه‌ای در روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون مورد پژوهش و مقایسه آن با روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه‌های ۴ و ۷ و ۱۰

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی برای سازه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع در تعیین دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در سازه جداسازی شده با جداساز LRB، به بررسی و نمایش نتایج حداکثر جابه‌جایی طبقات و سامانه‌های جداساز و جابه‌جایی نسبی طبقات و برش پایه ساختمان‌ها پرداخته شده است. در تمامی بررسی‌های انجام شده نتایج تحلیل

مراتب صحیحی را ارائه داده‌اند و از لحاظ مقداری، میزان درصد اختلاف آن‌ها، با روش تاریخچه زمانی غیرخطی بین ۷ تا ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین با افزایش ارتفاع سازه در سازه ۷ طبقه این میزان اختلاف به حداکثر ۱۵ درصد رسیده است.

طبقه، می‌توان نتیجه گرفت که در برآورد جابه‌جایی حداکثر سامانه جداساز LRB، روش‌های بار افزون تغییرمکان هدف آیین‌نامه ASCE41-13 با پنج الگوی توزیع بار جانبی شامل: مود اول، مثلثی (استاتیکی معادل)، یکنواخت، دینامیکی طیفی و PSC پاسخ‌های به



شکل ۸- حداکثر تغییرمکان افقی طبقات و جداساز در تحلیل‌های مورد تحقیق در سازه‌های (الف) ۴ طبقه، (ب) ۷ طبقه و (ج) ۱۰ طبقه

روش PSC که روش اصلاح شده الگوی بار مثلثی است، بالاتر بوده است.

با افزایش ارتفاع سازه، دقت روش الگوی توزیع بار یکنواخت در برآورد جابه‌جایی حداکثری طبقات برخلاف روش الگوی بار مثلثی افزایش پیدا کرده است و بیشترین میزان دقت را در بین سایر روش‌های مورد پژوهش از خود نشان داده است.

در جدول ۱۰ نتایج برش پایه سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه در تحلیل‌های مورد تحقیق ارائه شده است. مشاهده می‌شود که رفتار سازه جداسازی شده همانند یک جسم صلب بر روی فنری که همان سامانه جداساز است، عمل می‌کند. همچنین تغییرمکان سامانه جداساز عامل

در موضوع تغییرمکان طبقات سازه‌ها همانطور که در نمودار سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه مشاهده شده است، با توجه به وابستگی این تغییرمکان‌ها به جابه‌جایی کف اول سازه یا همان جابه‌جایی سامانه جداساز لرزه‌ای همانند موضوع جابه‌جایی سامانه جداساز روش‌های بار افزون مود اول، مثلثی (استاتیکی معادل)، یکنواخت، دینامیکی طیفی، PSC نتایج صحیحی را از خود نشان داده‌اند، در بین این روش‌ها در طبقات اول و دوم تمامی روش‌ها مقادیری نزدیک به هم دارند؛ ولی روش الگوی بار مثلثی در طبقات سوم به بالا مقادیر بیشتری را از خود ارائه داده است، که نشان دهنده کاهش دقت در برآورد تغییرمکان طبقات می‌باشد. برخلاف آن، میزان دقت نتایج

تعیین‌کننده برش پایه ساختمان می‌باشد و در برآورد برش پایه سازه‌ها، روش‌های بار افزون با الگوی مود اول، دینامیکی طیفی، یکنواخت، مثلثی و PSC به دلیل یکسان بودن تغییرمکان هدف، براساس آیین‌نامه

ASCE41-13، برش پایه تقریباً یکسانی را ارائه داده‌اند. نتایج روش‌های فوق‌الذکر، با دقت بالایی و با درصد اختلاف کمتر از ۱۰ درصد نزدیک به نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بوده است.

جدول ۱۰ برش پایه (برحسب تن) برای سازه‌های ۴،۷ و ۱۰ طبقه در تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی و دینامیکی تاریخچه زمانی

تعداد طبقات	PSC	یکنواخت	بار افزون با الگوی مود اول	مثلثی	دینامیکی طیفی	تاریخچه زمانی
۴	۲۱۵/۴	۲۱۵/۹	۲۱۵	۲۱۵	۲۱۵	۲۰۰/۴
۷	۳۱۳/۶	۳۱۴/۵	۳۱۳	۳۱۳	۳۱۳	۳۰۵/۶
۱۰	۴۲۲	۴۲۲/۸	۴۱۰	۴۲۲	۴۲۲	۴۲۶/۲

۳- در روش بار افزون با الگوی بار مثلثی با افزایش ارتفاع سازه، دقت این روش در برآورد جابه‌جایی حداکثری طبقات سازه جداسازی شده کاهش دارد و مقادیری بیشتر و البته محافظه‌کارانه با خطای بالایی را نسبت به تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی گزارش می‌کند.

۴- روش اصلاح شده بار افزون با الگوی بار PSC در مقایسه با روش الگوی بار مثلثی، در برآورد حداکثر جابه‌جایی طبقات سازه‌های جداسازی شده در ارتفاع مختلف دارای دقت قابل قبول‌تری است.

۵- با توجه به رفتار سازه جداسازی شده و اینکه همانند یک جسم صلب بر روی فنری که همان سامانه جداساز است عمل می‌کند، و نیز منظم بودن ساختمان در پلان و ارتفاع، در برآورد برش پایه سازه‌ها روش‌های بار افزون با الگوی مود اول، دینامیکی طیفی، یکنواخت، مثلثی و PSC، با توجه به یکسان بودن تغییرمکان هدف براساس آیین‌نامه ASCE41-13 و با دقت در این موضوع که تغییرمکان سامانه جداساز، عامل تعیین‌کننده برش پایه ساختمان می‌باشد، تمامی روش‌های فوق، برش پایه تقریباً یکسانی را ارائه داده‌اند. نتایج روش‌های فوق‌الذکر با دقت بالایی نزدیک

بنابراین نتایج زیر از این تحقیق حاصل می‌گردد:

۱- در برآورد حداکثر جابه‌جایی سامانه جداساز LRB، که جزو پارامترهای اصلی در طراحی سامانه جداساز و همچنین برش پایه سازه محسوب می‌شود، روش‌های بار افزون آیین‌نامه ASCE41-13 با پنج الگوی توزیع بار جانبی شامل مود اول، مثلثی (استاتیکی معادل)، یکنواخت، دینامیکی طیفی و PSC پاسخ‌های مناسبی ارائه داده‌اند و درصد اختلاف مقادیر این روش‌ها با روش تاریخچه زمانی در حدود ۶ تا ۱۲ درصد بوده است.

۲- در برآورد جابه‌جایی حداکثری طبقات در تمامی سازه‌های مورد پژوهش با توجه به وابستگی این تغییرمکان‌ها به جابه‌جایی کف اول سازه یا همان جابه‌جایی سامانه جداساز لرزه‌ای همانند موضوع جابه‌جایی سامانه جداساز، روش‌های بار افزون مود اول، یکنواخت، دینامیکی طیفی و PSC نتایج مناسبی نسبت به روش بار افزون با الگوی مثلثی داشته‌اند. با افزایش ارتفاع سازه نتایج روش بار افزون با الگوی بار یکنواخت دقت بالاتری در مقایسه با سایر روش‌ها به‌خصوص در طبقات بالای سازه دارد.

به نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بوده است.

## مراجع

- [1] Tanwer, M. T., Kazi, T. A., & Desai, M. (2019). "A Study on Different Types of Base Isolation System over Fixed Based", *In Information and Communication Technology for Intelligent Systems*, 725-734.
- [2] Cancellara, D., & De Angelis, F. (2016). "A base isolation system for structures subject to extreme seismic events characterized by anomalous values of intensity and frequency", *Composite Structures*, 157, 285-302
- [3] Tepes, O. F., & Ene, M. (2015). "Non-Linear Structural Analysis of Structures that Include Load-Bearing Walls Based on Performance Criteria", *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 61(2), 85.
- [4] Providakis, C. (2008). "Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations", *Engineering Structures*, 30(5), 1187-1198.
- [5] Fajfar, P. (2000). "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design", *Earthquake spectra*, 16(3), 573-592.
- [6] Providakis, C. (2008). "Pushover analysis of base-isolated steel-concrete composite structures under near-fault excitations", *Soil dynamics and earthquake Engineering*, 28(4), 293-304.
- [7] Wenbin, Q. J. L. (2000). "Static Pushover Analysis-an Analytical Tool for Performance/Displacement-Based Seismic Design", *Building Structure*, 6.
- [8] Kilar, V., Petrovic, S., Koren, D., & Silih, S. (2011). "Seismic analysis of an asymmetric fixed base and base-isolated high-rack steel structure", *Engineering Structures*, 33(12), 3471-3482.
- [9] Bhandari, M., et al. (2018). "Assessment of proposed lateral load patterns in pushover analysis for base-isolated frames", *Engineering Structures*. 175, 531-548.
- [10] Ferraioli, M., & Mandara, A. (2017). "Base isolation for seismic retrofitting of a multiple building structure: design, construction, and assessment", *Mathematical Problems in Engineering*.
- [11] Sharbatdar, M. K., Vaez, S. H., Amiri, G. G., & Naderpour, H. (2011). "Seismic response of base-isolated structures with LRB and FPS under near fault ground motions", *Procedia Engineering*. 14, 3245-3251.
- [12] Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). "Design of seismic isolated structures: from theory to practice" *John Wiley & Sons*.
- [13] Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). "Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering", *CRC press*.
- [14] FEMA-356 (2000). Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, DC. Federal Emergency Management Agency.
- [15] FEMA-273/274 (1997). Guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington, DC. Federal Emergency Management Agency.
- [16] Kilar, V., & Koren, D. (2010). "Simplified inelastic seismic analysis of base-isolated structures using the N2 method." *Earthquake engineering & structural dynamics*, 39(9), 967-989.
- [17] American Society of Civil Engineers (2010). Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures; Section 17 in ASCE 7-10; Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures ASC Reston, VA.
- [18] American Society of Civil Engineers (2014). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, VA.
- [19] FEMA-P695 (2009). Quantification of Building Seismic Performance Factors, Washington, DC. Federal Emergency Management Agency.

## پیوست- مقاطع مورد استفاده در سازه‌های پژوهش

تیر	مهاربند	ستون
IPE220	TUBO100X100X12.5	TUBO140X140X14.2
IPE240	TUBO120X120X12.5	TUBO160X160X12.5
IPE270	TUBO140X140X12.5	TUBO160X160X14.2
IPE300	TUBO160X160X14.2	TUBO180X180X14.2
	TUBO180X180X16	TUBO180X180X16
		TUBO180X180X17.5
		TUBO200X200X14.2
		TUBO200X200X17.5
		TUBO220X220X20
		TUBO220X220X25
		TUBO220X220X30
		TUBO260X260X40



## منحنی شکنندگی مخازن ذخیره‌سازی فولادی اتمسفریک

### متکی بر شمع

مخازن ذخیره سیال به‌ویژه مخازن روزمینی، از جمله سازه‌های مهم و حیاتی در زیرساخت‌های انرژی به‌شمار می‌آیند. این مخازن بیشتر برای ذخیره فرآورده‌های سیالات نفتی و ذخیره آب آتش‌نشانی استفاده می‌شود و لذا بهره‌برداری از مخازن پس از وقوع زمین‌لرزه دارای اهمیت بسزایی است. منحنی شکنندگی یا آسیب‌پذیری یکی از ابزارهای مؤثر جهت تخمین خسارت‌های وارده ناشی از رخداد زلزله است. در این تحقیق، هدف تهیه منحنی شکنندگی لرزه‌ای مخازن روزمینی متکی بر شمع می‌باشد. این منحنی شکنندگی بدون در نظر گرفتن آسیب‌دیدگی‌های بدنه مخزن و تنها با تمرکز بر رفتار سازه‌ای فونداسیون به‌دست آمده است. این تیپ مخازن عمدتاً در زمین‌های با ظرفیت باربری پایین ساخته می‌شوند. در این تحقیق، دو تیپ مخزن که مطابق با API650-13 در یک پروژه عملی طراحی شده است، به‌عنوان مطالعه موردی تحت بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، نخست با استفاده از روش تحلیل غیرخطی استاتیکی، منحنی ظرفیت سازه‌ای مخازن استخراج شده است. سپس عملکرد لرزه‌ای سازه‌ای این مخازن برای ۱۲ طیف از رکوردهای مختلف در شتاب‌های متفاوت به‌دست آمده است. در ادامه با در نظر گرفتن شاخص‌های خرابی سازه و انتخاب توزیع آماری مناسب برای معیارهای خرابی انتخاب شده، احتمال خرابی در سطوح مختلف محاسبه و منحنی شکنندگی سازه‌ای برای مخازن موردنظر به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده با منحنی شکنندگی مخازن که با در نظر گرفتن آسیب‌دیدگی‌های اجزای مکانیکی تهیه شده است، مقایسه گردیده است. این مقایسه نشان می‌دهد خرابی‌های اجزای مکانیکی زودتر از خرابی‌های سازه‌ای حادث می‌شود و رفتار لرزه‌ای مخازن عمدتاً با این خرابی‌ها کنترل می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** مخازن فولادی اتمسفریک، منحنی شکنندگی، شمع، خرابی.

مه‌دی شریفی\*

استادیار، دانشکده فنی  
مهندسی، دانشگاه قم.  
پست الکترونیک:  
m.sharifi@qom.ac.ir

ابوالقاسم معزی

مربی، دانشکده فنی مهندسی،  
دانشگاه قم.  
پست الکترونیک:  
moezi@qom.ac.ir

نسیم ثباتی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه،  
دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه  
قم.  
پست الکترونیک:  
sobati.nasim@yahoo.com

### ۱- مقدمه

فرآورده‌های سیالات نفتی و ذخیره آب آتش‌نشانی استفاده می‌شود، لذا بهره‌برداری از مخازن پس از وقوع زمین‌لرزه دارای اهمیت بسزایی است. پیش‌بینی میزان خرابی‌های مخازن ذخیره از مهمترین مسائل مدیریت بحران زلزله به‌شمار می‌رود. منحنی شکنندگی یا آسیب‌پذیری یکی از ابزارهای مؤثر جهت تخمین خسارت‌های وارده از رخداد زلزله است. این منحنی‌ها براساس سطوح عملکردی احتمال فراگذشت خرابی یا خسارت را بیان می‌کنند و به‌عنوان ابزار اولیه در تحلیل

مخازن ذخیره سیال به‌ویژه مخازن روزمینی، از جمله سازه‌های مهم و حیاتی در زیرساخت‌های انرژی به‌شمار می‌آیند. این مخازن بیشتر برای ذخیره

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۴/۰۷، بازنگری ۱۳۹۸/۰۶/۰۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۲۱.  
DOI: 10.22091/cer.2019.3804.1136 شناسه دیجیتال

ابتدا مدل سه‌بعدی از سازه که در آن مخزن به همراه فونداسیون مدل‌سازی شده، تهیه گردیده است. با توجه به اثرات قابل‌توجه اندرکنش خاک و سازه، رفتار خاک با استفاده از فنرهای غیرخطی در مدل وارد شده است. جهت اعمال نیروی هیدرودینامیک سیال از نتایج مدل ایده‌آل دو جرمی هازنر [۶] استفاده گردید. در این تحقیق، دو تیپ مخزن که مطابق API650-13 در یک پروژه عملی طراحی شده است، به‌عنوان مطالعه موردی تحت بررسی قرار گرفته است. به‌همین منظور نخست با استفاده از روش تحلیل غیرخطی استاتیکی، منحنی ظرفیت سازه‌ای مخازن به‌دست آمده است. سپس عملکرد لرزه‌ای سازه‌ای این مخازن برای ۱۲ طیف رکورد مختلف در شتاب‌های متفاوت محاسبه شده است. در ادامه، بعد از انتخاب شاخص‌های خرابی بر روی سازه و انتخاب توزیع آماری مناسب برای معیارهای خرابی انتخاب شده، احتمال فراگذشت خرابی در سطوح مختلف و منحنی شکنندگی سازه‌ای برای مخازن مورد نظر به‌دست‌آمده است.

در حالت کلی چارچوب اصلی برای توسعه منحنی‌های شکنندگی به شرح زیر می‌باشد:

۱- تهیه مدل سازه و به‌دست‌آوردن منحنی ظرفیت سازه مورد نظر.

۲- انتخاب مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله برای تجزیه و تحلیل شکنندگی و به‌دست‌آوردن طیف تقاضا.

۳- تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه مورد مطالعه در زلزله‌ای انتخاب شده براساس سطوح مختلفی از شدت حرکت زمین.

۴- تعیین معیارهای خسارت و تولید منحنی‌های شکنندگی.

۵- استفاده از توابع پیوسته لگاریتم نرمال و فرمول‌های منحنی شکنندگی جهت تولید منحنی شکنندگی ساده شده.

ریسک مورد استفاده قرار می‌گیرند. محققان منحنی‌های شکنندگی را در زمینه‌های مختلف توسعه داده‌اند. به‌طور مثال، کندی<sup>۱</sup> و همکاران، منحنی‌های شکنندگی را برای نیروگاه هسته‌ای رسم کردند [۱]. فقیه ملیک<sup>۲</sup> و همکاران، تأثیر ارتفاع ساختمان در منحنی شکنندگی را در قاب خمشی بتنی ۳، ۵ و ۷ طبقه مورد مطالعه قرار دادند [۲]. گودرزی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک قاب بتنی با در نظر گرفتن تأثیر تغییرات سختی و میلگرد بر عملکرد لرزه‌ای قاب بتنی را مورد ارزیابی قرار داد [۳]. درخشنده و همکاران، منحنی شکنندگی را برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مخازن در مناطق لرزه‌خیز بررسی کردند [۴]. پائولوچی<sup>۳</sup> و همکاران، مخازن ذخیره‌سازی سیال صنعتی متکی روی ستون کوتاه RC را مورد مطالعه قرار دادند [۵].

هدف اصلی در این تحقیق، تهیه منحنی شکنندگی لرزه‌ای مخازن روزمینی متکی بر شمع می‌باشد که تاکنون انجام نشده است. این مخازن عمدتاً در زمین‌های با ظرفیت باربری پایین ساخته می‌شوند. منحنی‌های شکنندگی در این پژوهش، بدون در نظر گرفتن آسیب‌دیدگی‌های بدنه مخزن و تنها با تمرکز بر رفتار سازه‌ای به‌دست‌آمده است. جزئیات و مراحل انجام کار در ادامه بیان شده است.

## ۲- روش انجام کار

### ۲-۱- مراحل انجام کار

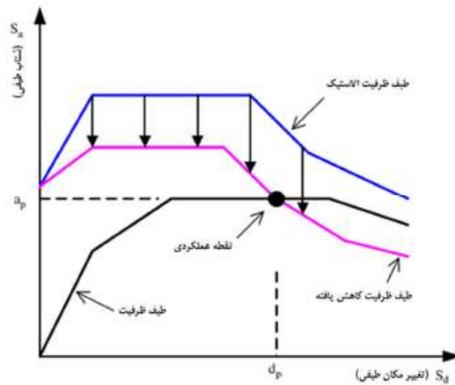
با توجه به هدف اصلی در این تحقیق که تهیه منحنی‌های شکنندگی مخازن ذخیره سیالات روزمینی متکی بر شمع است؛ فرضیات و روش‌های زیر در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup>- Kennedy

<sup>2</sup>- Faghihmaleki

<sup>3</sup>- Paolacci

است. این مخازن، به‌عنوان مخازن آب آتش‌نشانی در پروژه‌های عملی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که با توجه به ظرفیت پایین باربری خاک این مخازن، فونداسیون بر روی شمع قرار داده شده‌اند.



شکل ۱- تحلیل به روش طیف ظرفیت

در جدول ۲، ابعاد مقاطع شمع‌ها مشاهده می‌شود. در این نامگذاری، C نشان‌دهنده ابعاد شمع مربعی، عدد کنار C نشان‌دهنده بعد شمع‌ها، عدد قبل از T نشان‌دهنده تعداد آرماتورها، و عدد بعد از T نشان‌دهنده شماره آرماتورها می‌باشد. همچنین در شکل ۲، نمایی کلی از جزئیات فونداسیون مخزن شماره ۲ نشان داده شده است.

### ۲-۳- جزئیات مدل‌سازی و نتایج تحلیل

مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی انجام شده که در آن بدنه مخزن به‌همراه فونداسیون آن مدل‌سازی گردیده است. جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار Sap2000-Ver14 استفاده شده است. جزئیات کلی این مدل‌سازی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در این مدل، بدنه مخزن و سرشمع‌ها با استفاده از المان خطی shell مدل‌سازی شده، شمع‌ها با استفاده از المان frame و اندرکنش خاک و سازه با استفاده از فنرهای غیرخطی<sup>۹</sup> مدل شده‌اند. بدنه تانک نقش مؤثری در رفتارهای غیرخطی سازه‌ای ندارند و به همین دلیل با المان صفحه‌ای خطی مدل‌سازی شده‌اند.

<sup>۹</sup>- Non Linear link

جزئیات کامل از مراحل فوق در مرجع [۷] ارائه شده است که برای اطلاعات بیشتر می‌توان به آن مراجعه نمود.

### ۲-۲- روش تحلیل لرزه‌ای

در تولید منحنی‌های شکنندگی، روش‌های مختلفی برای به‌دست آوردن پاسخ‌های لرزه‌ای سازه استفاده شده‌اند که شامل روش انرژی برابر، روش طیف غیرارتجاعی و روش طیف ظرفیت (CSM<sup>۴</sup>) می‌باشد [۸-۱۲]. در این مطالعه، منحنی‌های پاسخ سازه‌ها، با استفاده از روش تحلیلی استاتیکی غیرخطی و طیف ظرفیت استفاده شده است. مبانی روش طیف ظرفیت در آیین‌نامه ATC-40 ارائه شده است [۱۲]. در این روش برای ارزیابی لرزه‌ای، با استفاده از روابط منحنی ظرفیت سازه و منحنی طیف لرزه‌ای، در یک دستگاه مختصات که شامل طیف پاسخ شتاب (Sa<sup>۵</sup>) در مقابل جابه‌جایی (Sd<sup>۶</sup>) است و به آن فرمت ADRS<sup>۷</sup> گفته می‌شود، مطابق با شکل ۱، تبدیل می‌گردد. سپس طیف ظرفیت با توجه به میرایی ایجاد شده در سازه، با اعمال ضریب اصلاح که تابع میرایی مؤثر در حداکثر پاسخ سازه است، کاهش داده می‌شود. محل تقاطع طیف نیاز کاهش یافته و طیف ظرفیت که بیانگر نقطه عملکرد سازه می‌باشد تعیین می‌گردد.

### ۳- مدل‌سازی و جزئیات

#### ۳-۱- هندسه و جزئیات مخازن

در این پژوهش، دو مدل مخزن روزمینی فولادی متکی بر شمع بتنی در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، مشخصات هندسی و سایر جزئیات آن ارائه گردیده

<sup>۴</sup>- Capacity Spectrum Method

<sup>۵</sup>- Spectral acceleration

<sup>۶</sup>- Spectral displacement

<sup>۷</sup>- Acceleration-Displacement Response Spectral

جداره‌های شمع و مقاومت نوک شمع تأمین می‌شود و رفتار آن در ادبیات فنی رایج با سه نوع فتر  $Q-Y$ ،  $P-Y$  و  $T-Z$  شبیه‌سازی می‌شوند. مشخصات فنرها براساس ضوابط API-RP2A تعیین شده است (شکل ۴ و ۵).

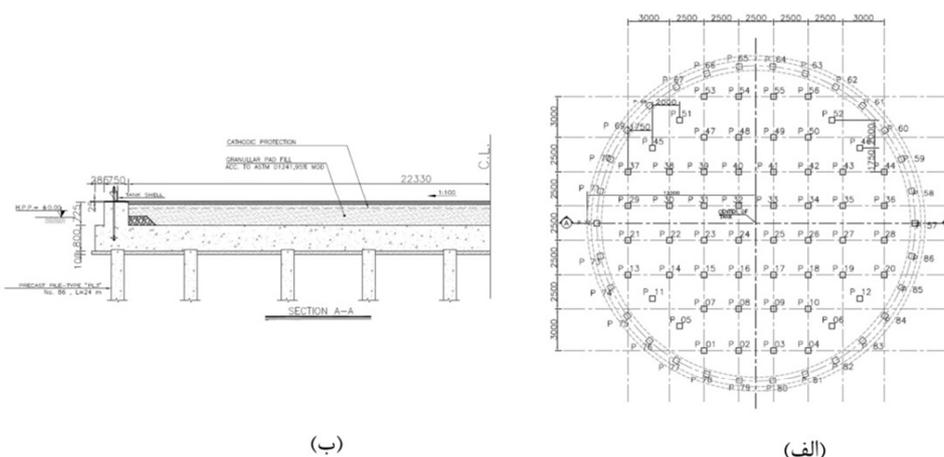
رفتار اصلی سازه توسط شمع‌ها، رفتار پلاستیک آنها و اندرکنش آن با خاک اطراف شمع‌ها تعیین می‌گردد. رفتار بار- تغییر مکان خاک با استفاده از فنر مدل‌سازی شده است. مقاومت محوری و جانبی شمع‌ها براساس ترکیبی از چسبندگی بین خاک و شمع یا انتقال بار در طول

جدول ۱- مشخصات کلی مخازن مورد مطالعه

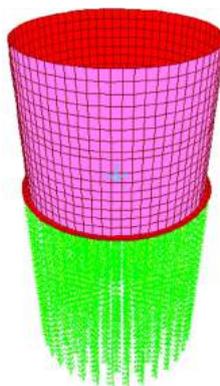
نام مدل	محل ساخت	قطر مخزن	ارتفاع مخزن	تعداد شمع‌ها	نوع شمع‌ها
مخزن ۱	بندر ماهشهر	۴/۵	۱۵	۷	پیش ساخته
مخزن ۲	اهواز	۲۵	۱۴	۸۶	پیش ساخته

جدول ۲- مشخصات شمع‌های مورد استفاده

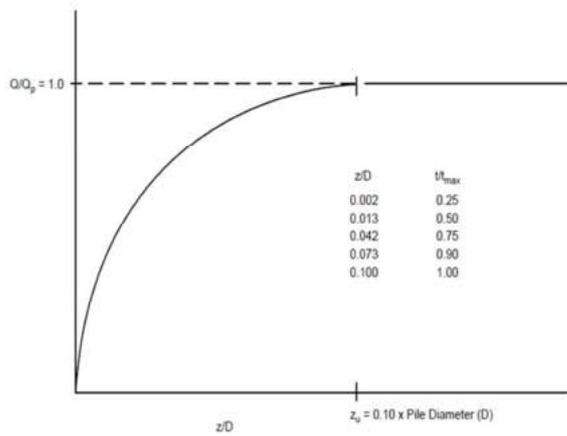
نوع مخازن	مقطع شمع در اعماق (متر)	مقاطع شمع در اعماق مختلف
مخزن ۱	۵	C40*40-8T20+8T25
	۷	C40*40-8T25
	۱۲	C40*40-8T20
مخزن ۲	۵	C40*40-16T25
	۶	C40*40-8T25
	۱۳	C40*40-8T20



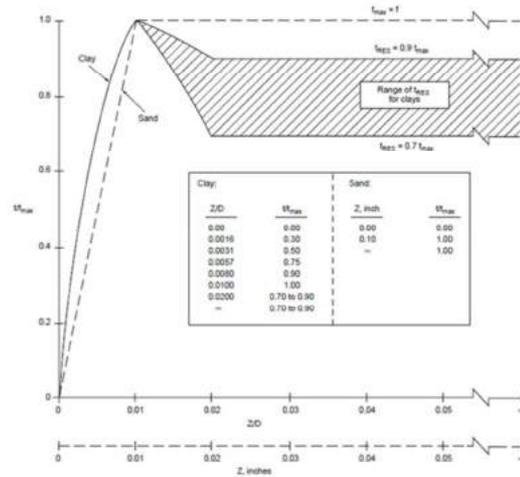
شکل ۲- (الف) پلان و (ب) مقطع شمع‌ها در مخزن ۲



شکل ۳- نمای کلی از مدل‌سازی مخزن ۲ در برنامه تحلیلی

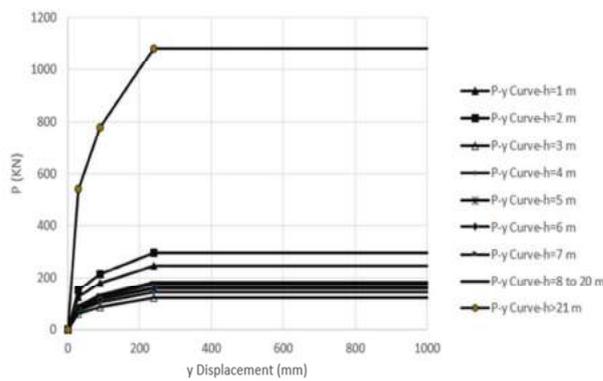


(ب)

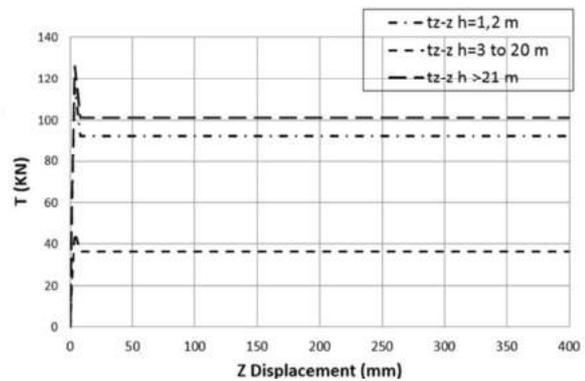


(الف)

شکل ۴- منحنی‌های رفتاری فنرهای خاک پیشنهادی در API-RP2A (الف) منحنی رفتاری T-Z و (ب) منحنی رفتاری P-Y [۱۳]



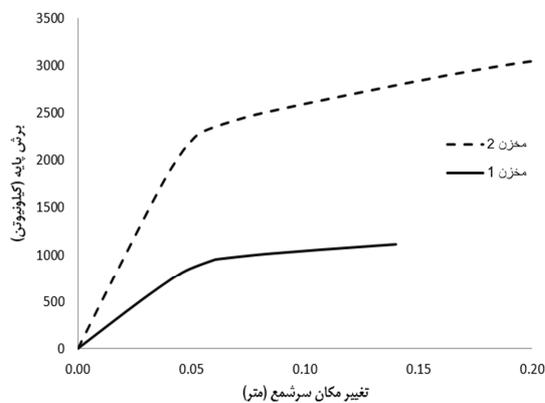
(ب)



(الف)

شکل ۵- نمونه‌ای از منحنی‌های رفتاری اعمال شده در مخزن شماره ۲، (الف) منحنی رفتاری T-Z و (ب) منحنی رفتاری P-Y

جهت برآورد پاسخ سازه در زلزله‌های مختلف، ۱۲ رکورد از سایت PEER استفاده شده است که مشخصات رکوردهای انتخاب شده در جدول ۳ آمده است



شکل ۶- منحنی پوش‌آور مخزن ۱ و ۲

همچنین رفتار غیرخطی سازه‌های شمع‌ها با اعمال مفاصل اندرکنشی نیروی محوری و لنگر خمشی (P-M-M) براساس ضوابط Fema356 در نظر گرفته شده است. در حالت کلی برش ناشی از نیروهای هیدرودینامیک مخزن از طرف میل‌مه‌ارهای بدنه به سرشمع و از طریق سرشمع به شمع‌ها منتقل می‌گردد. با توجه به انعطاف‌پذیری بدنه و به‌منظور برآورد صحیح رفتار سازه‌ای در این تحلیل‌ها، مرکز فونداسیون به‌عنوان تغییرمکان هدف در نظر گرفته شده است. منحنی پوش‌آور به‌دست آمده مخازن در شکل ۶ آورده شده است.

۳-۳- معرفی رکوردهای زلزله

## ۴- منحنی‌های شکنندگی

انتخاب شده است. برای هر ۱۲ رکورد، طیف زلزله در ۱۰ شدت مختلف بین ۰/۱g تا ۲g مقیاس و محاسبه می‌گردد. همچنین برای هر سطح PGA، نقطه عملکرد سازه با توجه به رکورد و شدت آن محاسبه می‌شود.

## ۴-۱- روش انجام کار

در این تحقیق، PGA (بیشینه دامنه شتاب نگاشت) به‌عنوان یک پارامتر برای نشان دادن شدت حرکات زمین

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله

نام زلزله	بزرگی (Ms)	حداکثر شتاب زلزله (g)	مدت زمان زلزله (ثانیه)
Imperial valley-06	۶/۵۳	۰/۲۰۱۹	۲۸
Hecormine	۷/۱۳	۰/۰۸۷۶	۷۰
Tabas,Iran	۷/۳۵	۰/۱۰۴۸	۴۰
Montenegro,Yagoslavi	۷/۱	۰/۲۵۳	۴۸
Mammath Lakes	۶/۰۶	۰/۴۳۰۲۹	۳۰
Lytte creek	۵/۳۳	۰/۰۲۱۵	۱۳
Whittier Narrows-01	۵/۹	۰/۱۳۳۹	۳۲
Cape Mendocino	۷/۰۱	۰/۲۲۸	۳۶
Chalfant Vally	۶/۱۹	۰/۱۱۴۲	۴۰
Northridge	۶/۶۹	۰/۳۱۶	۴۰
Lome Prieta	۶/۹۳	۰/۵۵۹	۴۰
Fruli,Italy-01	۷	۰/۱۱۵	۱۶

با استفاده از روابط (۲) تا (۵) محاسبه می‌گردد [۱۳] و [۱۴]:

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (2)$$

$$\zeta^2 = \ln[1 + \delta^2] \quad (3)$$

$$\delta = \sigma / \mu \quad (4)$$

$$p[S > s | PGA] = \quad (5)$$

$$P[X > x_i | PGA] = 1 - \phi \left[ \frac{\ln(x_i) - \lambda}{\zeta} \right]$$

برای استفاده راحت‌تر، منحنی‌های شکنندگی معمولاً به‌عنوان توابع توزیع تجمعی لاگ نرمال بیان شده است [۱۶-۱۸]. به این ترتیب، منحنی‌های شکنندگی را می‌توان با تنها دو پارامتر به شرح زیر نشان داد:

با محاسبه مقادیر نقطه عملکرد برای رکوردهای انتخاب شده در سطوح مختلف PGA، یک ماتریس ۱۲ در ۱۰ پاسخ تولید شده است. برای هر ستون ماتریس با استفاده از توزیع لاگ نرمال با تابع چگالی احتمال (PDF<sup>۱۱</sup>) به صورت رابطه (۱) استفاده شده است:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \quad 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق،  $\lambda$  و  $\zeta$  دو پارامتر از توزیع لاگ نرمال از جابه‌جایی متغیر تصادفی  $x$  هستند. این دو پارامتر را می‌توان از اطلاعات دو پارامتر توزیع نرمال محاسبه کرد. میانگین ( $\mu$ ) و انحراف استاندارد ( $\sigma$ ) نمونه مورد مطالعه

<sup>۱۱</sup> - Probability Density Function

$$z = \phi^{-1}[F_A(a)] \quad (۸)$$

بنابراین، منحنی‌های شکنندگی به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$F_A(a) = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{for } a < a_t \\ \int_0^{a-at} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_A(a-a_t)} \times \exp\left[-\frac{1}{2} \times \left(\frac{\ln(a-a_t) - \ln m_A}{\zeta_A}\right)^2\right] \right] da \\ \rightarrow \text{for } a \geq a_t \end{cases} \quad (۹)$$

در جداول ۴ و ۵ پارامترهای مربوط به منحنی‌های شکنندگی، جدول ۶ و ۷ تغییرمکان‌های هدف مخزن تحت اثر زلزله‌های متفاوت و در شکل‌های ۷ و ۸ منحنی‌های شکنندگی حاصله نشان داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای توزیع لگاریتم نرمال مخزن ۱

$m_A$ (g)	$\ln(m_A)$	$A\zeta$	سطح خرابی
۰/۳۷۷۹	-۰/۹۷	۱/۱۱	(I)
۱/۰۲۰۲	۰/۰۲	۰/۸۹۹	(II)
۳/۸۵۷۴	۱/۳۵	۰/۷۳۸	(III)
۹/۷۷۶۶	۲/۲۸	۱/۰۹۰	(III)

جدول ۵- پارامترهای توزیع لگاریتم نرمال مخزن ۲

$m_A$ (g)	$\ln(m_A)$	$A\zeta$	سطح خرابی
۰/۴۱۰۶	-۰/۸۹	۰/۷	(I)
۰/۹۶۷۵	-۰/۰۳۳	۰/۷۵	(II)
۴/۰۵۰۳	۱/۴۰	۰/۷۷	(III)
۲۴/۵۲۷	۳/۲۰	۱/۲۰	(III)

می‌باشد. به عبارت دیگر، در یک سطح خطر زلزله، احتمال فراگذشت خرابی‌های بدنه و اجزای مخزن بیشتر از احتمال فراگذشت خرابی اجزای سازه‌ای است. لذا آسیب دیدگی‌های محتمل بدنه و اجزای مکانیکی، کنترل کننده پاسخ لرزه‌ای بوده و پیامدهای خرابی بدنه و اجزای مکانیکی، کنترل کننده ریسک اولیه در مجتمع‌های صنعتی می‌باشند.

$$F_A(a) = \int_0^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_A a} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln a - \ln m_A}{\zeta_A}\right)^2\right] da \quad (۶)$$

در رابطه فوق، که  $a$  متغیر تصادفی PGA است،  $m_A$  معادل میانگین  $a$  و  $\zeta_A$  انحراف استاندارد لگاریتمی  $A$  می‌باشد. معادله (۶) می‌تواند به تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد با آرگومان  $z$  مطابق با رابطه (۷) باشد که در آن  $Z$  متغیر نرمال استاندارد است و به صورت  $z = [\ln(a) - \ln(m_A)] / \zeta_A$  تعریف شده است:

$$F_A(a) = \phi[z] \quad (۷)$$

در منحنی شکنندگی، برای احتمال شکنندگی  $F_A(a)$  در سطح PGA از  $a$ ، متغیر نرمال مربوطه را می‌توان با استفاده از رابطه (۸) محاسبه کرد:

با توجه به اینکه خرابی در تانک‌ها شامل خرابی در بدنه و اجزای مکانیکی و اجزای سازه‌ای می‌باشد، نتایج به‌دست آمده با منحنی شکنندگی مخزن ارائه شده توسط سالزانو و همکاران [۱۹] (شکل ۹) که با در نظر گرفتن خرابی‌های بدنه مخزن ارائه شده است، مقایسه گردید. با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان گفت انتظار مشاهده آسیب دیدگی‌های اجزای مکانیکی زودتر از خرابی سازه‌ای

جدول ۶- نقاط عملکردی به‌دست آمده در مخزن ۱ (سانتی متر)

PGA (g)											نام زلزله
۲	۱/۸	۱/۶	۱/۴	۱/۲	۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۱	
۶/۸۳	۶/۴۸	۶/۱۱۷	۵/۷۶	۵/۳۴۴	۴/۸۵	۴/۱۶	۳/۲۲	۲/۱۹	۱/۱۰	۰/۵۵	Chalfant Vally
۹/۸۸	۹/۵۱	۹/۰۱۸	۸/۳۶	۷/۵۶۱	۶/۵۰	۵/۷۲	۵/۰۴۲	۴/۰۸	۲/۲۲	۱/۱۲	Hecormine
۴/۹۵	۴/۵۱	۴/۰۴	۳/۵۳	۳/۰۳	۲/۵۲	۲/۰۲	۱/۵۱	۱/۰۱	۰/۵۰	۰/۲۵	Imperial valley-06
۱۰/۳۹	۹/۸۳	۹/۲۳۳	۸/۷۳	۸/۱۶۳	۷/۵۳	۶/۸۱	۵/۷۶	۳/۹۵	۱/۹۷	۰/۹۸	Lome Prieta
۱۲/۹	۱۲/۱۹	۱۱/۳۸۹	۱۰/۳۱	۸/۹۷۲	۸/۳۰	۷/۴۱	۶/۲۳	۵/۰۷	۲/۸۵	۱/۴۳	Lytte creek
۳/۵۶	۳/۲۴	۲/۹۱۸	۲/۵۷	۲/۲۱	۱/۸۵	۱/۴۸	۱/۱۱	۰/۷۴	۰/۳۷	۱/۸۶	Cape Mendocino
۱۲/۸۶	۱۲/۰۴	۹/۰۸	۸/۵۹	۸/۰۲۶	۷/۳۶	۶/۵۷	۵/۹۸	۴/۲۴	۲/۲۲	۱/۱۲	Mammath Lakes
۱۲/۰۲	۱۱/۵۴	۱۰/۹۹۳	۱۰/۳۵	۹/۶	۸/۷۳	۷/۶۸	۶/۳۱	۵/۰۸	۳/۱۸	۱/۶۶	Montenegro, Yagoslavi
۱۰/۵۱	۱۰/۲۰	۹/۸۴۳	۹/۴۳	۸/۷۹۱	۷/۹۸	۵/۶۲	۴/۸۷	۳/۴۰	۱/۷۰	۰/۸۵	Northridge
۱۰/۶۶	۱۰/۱۳	۹/۵۶	۸/۹۱	۸/۱۶۵	۷/۴۷	۶/۷۶	۵/۷۱	۴/۵۱	۲/۵۲	۱/۲۷	Tabas, Iran
۷/۹۵	۷/۴۰	۶/۸۷۶	۶/۳۱	۵/۹۵۲	۵/۵۵	۵/۰۵	۴/۲۵	۲/۹۸	۱/۵۲	۰/۷۶	Whittier Narrows-01
۱۲/۵۰	۱۰/۶۹	۸/۹۰۶	۸/۲۱	۷/۲۸	۶/۲۲	۵/۵۰	۴/۷۳۶	۳/۵۶	۱/۸۸	۰/۹۵	FruLi, Italy-01

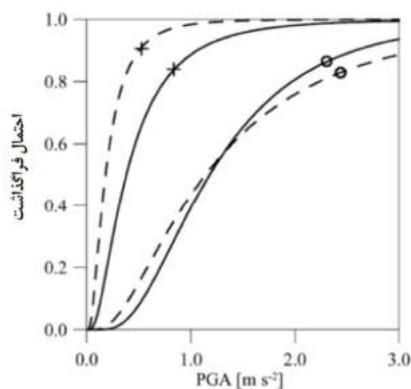
جدول ۷- نقاط عملکردی به‌دست آمده در مخزن ۲ (سانتی متر)

PGA (g)											نام زلزله
۲	۱/۸	۱/۶	۱/۴	۱/۲	۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۱	
۱۴/۸۴	۱۳/۹۱	۱۲/۳۵	۱۰/۷۱	۹/۳۲	۷/۹۵	۶/۵۲۵	۴/۹۰۷	۳/۲۲	۱/۶۶	۰/۸۴۵	Chalfant Vally
۱۶/۸۹	۱۵/۸۵	۱۴/۹۶	۱۴/۱۴	۱۳/۱	۱۱/۹۴	۱۰/۳۲	۸/۴۱	۶/۱۴	۳/۱۰	۱/۵۶	Hecormine
۱۶/۷۰	۱۵/۷۰	۱۴/۶	۱۳/۱	۱۱/۳	۹/۶۹	۸/۰۳	۶/۲۹	۴/۲۲	۲/۱۳	۱/۰۸	Imperial valley-06
۱۵/۶۸	۱۴/۸۳	۱۴/۰۱	۱۲/۹۷	۱۱/۵	۹/۶۷۵	۷/۵۸	۵/۸۳	۳/۸۹	۱/۹۷	۱/۰۰	Lome Prieta
۱۲/۷۸	۱۲/۲۶	۱۱/۶۸	۱۱/۱۳	۱۰/۴	۹/۶۸	۸/۵۵۱	۷/۰۴	۴/۷۸	۲/۴۱	۱/۲۲	Lytte creek
۷/۷۷	۷/۳۱	۶/۸۱	۶/۰۳۴	۵/۱۹	۴/۳۳	۳/۴۷۵	۲/۶۱۴	۱/۷۵	۰/۸۹	۰/۴۶	Cape Mendocino
۱۸/۵۵	۱۶/۷۲	۱۵/۰۴	۱۳/۲۲	۱۱/۲	۹/۴۵	۷/۶۹	۵/۸۸	۳/۹۳	۱/۹۸	۱/۰۱	Mammath Lakes
۱۳/۱۰	۱۲/۵۴	۱۱/۹۲	۱۱/۱۴	۱۰/۲	۹/۱۰	۷/۸۰	۶/۱۷	۴/۱۷	۲/۰۹	۱/۰۶	Montenegro, Yagoslavi
۱۸/۰۰	۱۶/۹۹	۱۵/۸۳	۱۴/۱۶	۱۱/۸	۹/۸۲	۸/۰۸	۶/۴۲	۴/۳۰	۲/۱۷	۱/۱۰	Northridge
۲۰/۳۵	۱۵/۳۶	۱۴/۷۵	۱۴/۰۶	۱۳/۲	۱۲/۳	۱۱/۰۵	۸/۷۵	۵/۹۴	۲/۹۹	۱/۵۱	Tabas, Iran
۹/۰۸	۸/۳۸	۷/۶۴	۶/۸۷	۵/۹۴	۴/۹۶	۳/۹۸	۲/۹۹	۲/۰۰	۱/۰۲	۰/۵۳	Whittier Narrows-01
۲۲/۸۷	۲۱/۵۴	۱۸/۲۴	۱۶/۷۰	۱۵/۴	۱۳/۷۵	۱۱/۱۷	۸/۵۶	۵/۸۸	۲/۹۶	۱/۵۰	FruLi, Italy-01

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، منحنی شکنندگی مخازن روزمینی ذخیره‌سازی سیال استخراج شده است. نتایجی که از این تحقیق می‌توان به آن اشاره نمود عبارتند از:

برآورد های خسارت های مجتمع های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۹- منحنی شکنندگی اجزای مکانیکی مخزن [۱۸]

۱- مقایسه نتایج حاصله با منحنی های شکنندگی مخازن که با در نظر گرفتن خرابی های بدنه و اجزای مکانیکی به دست آمده اند، نشان می دهد در زلزله انتظار مشاهده آسیب دیدگی های بدنه و اجزای مکانیکی زودتر از خرابی سازه ای بوده و پیامدهای خرابی بدنه و اجزای مکانیکی، کنترل کننده ریسک اولیه در مجتمع های صنعتی می باشند.

۲- منحنی های شکنندگی تولید شده می تواند به عنوان ابزار کمی اولیه در تحلیل ریسک و

## مراجع

- [1] Kennedy, R. P., Cornell, C. A., Campbell, R. D., Kaplan, S., & Perla, H. F. (1980). "Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant", *Nuclear Engineering and Design*, 59(2), 315-338.
- [2] Faghihmaleki, H., Abdollahzadeh, G., & Jamnani, H. H. (2014). "Effect of Structure Height in Seismic Fragility Curve", *Journal of Applied Mathematics in Engineering, Management and Technology*, 2(6), 498-503.
- [3] Goudarzi. (2013). "Evaluation Of Seismic Performance, Dynamic In-Stability And Preparing IDA And Fragility Curve Of Concrete Regular Moment Frame Considering Beam and Column Strength Variation", Ms.C Thesis.
- [4] Derakhshandeh, H. (2014), "Fragility Curve of Elevated Concrete Storage", *International on Civil Engineer Conferences*, No. ICCE10-0863
- [5] Paolacci, F., Phan, H. N., Corritore, D., Alessandri, S., Bursi, O. S., & Reza, M. S. (2015). "Seismic fragility analysis of steel storage tanks", In *Proceedings of the 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2054-2065.
- [6] Housner, G. W. (1957). "Dynamic pressures on accelerated fluid containers", *Bulletin of the seismological society of America*, 47(1), 15-35.
- [7] Chiou, J. S., Chiang, C. H., Yang, H. H., & Hsu, S. Y. (2011). "Developing fragility curves for a pile-supported wharf", *Soil dynamics and earthquake engineering*, 31(5-6), 830-840.
- [8] International Navigation Association (PIANC). (2001). *Seismic design guidelines for port structures*. A.A.Balkema Publish.
- [9] Luo, X., Murono, Y., & Nishimura, A. (2002). "Verifying adequacy of the seismic deformation method by using real examples of earthquake damage", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(1), 17-28.
- [10] Fajfar, P. (1999). "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28(9), 979-993.
- [11] Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2000). "Evaluation of NSP to estimate seismic deformation: SDF systems", *Journal of Structural Engineering*, 126(4), 482-490.
- [12] Council, A. T. (1996). "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", *Report No. SSC 96-01: ATC-40, 1*.
- [13] API Recommended Practice 2A-WSD. (2002). "Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design", *American Petroleum Standard*.
- [14] Haldar, A., & Mahadevan, S. (2000). *Reliability assessment using stochastic finite element analysis*. John Wiley & Sons.
- [15] Hwang, H. H., & Jaw, J. W. (1990). "Probabilistic damage analysis of structures", *Journal of Structural Engineering*, 116(7), 1992-2007.
- [16] HAZUS99, F. E. M. A. (1999). *Earthquake Loss Estimation Methodology: User's Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [17] Yeh, C. H. (2003). "Taiwan earthquake estimation system—TELES", *National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan (in Chinese)*.

[18] Cimellaro, G. P., & Reinhorn, A. M. (2010). "Multidimensional performance limit state for hazard fragility functions", *Journal of engineering mechanics*, 137(1), 47-60.

[19] Salzano, E., Iervolino, I., & Fabbrocino, G. (2003). "Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16(5), 403-409.

## بررسی اثرات سازه زیرزمینی بر جابه‌جایی‌های سطح زمین تحت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت

مطالعات محققین اثبات می‌کند که رکوردهای مربوط به یک زلزله که در نقاط مختلف زمین ثبت می‌شوند، به دلیل عواملی چون محدود بودن سرعت انتشار امواج زلزله، تفرق امواج از نظر دامنه و فاز، تفاوت‌هایی دارند. این امر، لزوم کاربرد مفهوم تغییرات مکانی حرکت زمین در زمان زلزله را برای به‌کارگیری در آنالیزهای دینامیکی سازه‌ها نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC مدل ایستگاه مترو دایکای تهیه و در دو وضعیت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. پدیده بزرگنمایی ناشی از تفرق امواج لرزه‌ای با حضور سازه مترو و بدون آن، شتاب‌های حداکثر روی سطح زمین و بین لایه‌های تشکیل دهنده اطراف ایستگاه، تغییرمکان نسبی سازه و همچنین طیف ارتباط بین زوج نقاط در دو وضعیت بارگذاری ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بزرگنمایی به مقدار ۱/۷۵ در نقطه نزدیک سازه و در وضعیت بارگذاری غیریکنواخت اتفاق افتاده است. همچنین برای افزایش دقت در تخمین شتاب‌های سطح زمین، علاوه بر وجود سازه، وضعیت بارگذاری غیریکنواخت نیز باید در نظر گرفته شود.

**واژگان کلیدی:** بارگذاری یکنواخت، بزرگنمایی، سازه زیرزمینی، تفاضل محدود، بارگذاری غیریکنواخت.

محسن ایناری

دکتری مهندسی عمران، دانشگاه  
تبریز، ایران.  
پست الکترونیک:  
isari.mohsen@tabrizu.ac.ir

رضا تارینژاد\*

دانشیار، دانشکده مهندسی  
عمران، دانشگاه تبریز، ایران.  
پست الکترونیک:  
r\_tarinejad@tabrizu.ac.ir

سید کاظم رضوی

دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه  
تبریز، ایران.  
پست الکترونیک:  
skrazavi2010@gmail.com

### ۱- مقدمه

شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در فواصل نزدیک به هم نیز مشاهده شده است که این امر لزوم به‌کارگیری مفهوم تغییرات مکانی حرکت زمین در زمان زلزله را برای کاربرد آنالیزهای دینامیکی سازه‌ها ایجاب می‌کند [۱]. عوارض توپوگرافی همچون دره‌ها و همچنین سازه‌هایی همانند تونل‌ها و متروها که در زیر زمین ساخته می‌شوند نیز موجب پدیدار شدن اختلالاتی در انتشار امواج و همچنین انکسار و تفرق امواجی که از یک منبع زلزله می‌آیند، می‌گردد. عمده تحقیقات انجام شده روی این پدیده را می‌توان بعد از نصب اولین آرایه شتاب‌سنج‌های SMART-1 در اوایل دهه ۸۰ دانست، زمانی که دسترسی به داده‌های حاصل از این شتاب‌سنج‌ها میسر شد. بنابراین اطلاعات زیادی از این داده‌ها در مورد تغییرات مکانی زمین‌لرزه و عوامل مؤثر روی آن حاصل

مطالعات بسیاری در گذشته تاکنون نشان داده‌اند که رکوردهای مربوط به یک زلزله که در نقاط مختلف زمین ثبت می‌شوند به دلیل عواملی چون محدود بودن سرعت انتشار امواج زلزله، انعکاس و تفرق امواج، فاصله گرفتن از مرکز انتشار و همچنین تفاوت در نوع خاک در آن محل، با هم متفاوت بوده و ممکن است شتاب‌های مربوط به یک زلزله که در دو محل مختلف ثبت شده‌اند، با یکدیگر تفاوت‌هایی را داشته باشند. این تفاوت حتی در

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۰۴، بازنگری ۱۳۹۸/۰۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۲۸.  
(DOI): 10.22091/cer.2019.4760.1167 شناسه دیجیتال

نشان دادند که حضور این سازه‌ها تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بزرگنمایی ایجاد شده ناشی از حفره‌ها در سطح زمین دارند [۱۱-۱۴]. پنجی و همکاران نیز با استفاده از روش المان مرزی، به بررسی اثرات سازه‌های زیرزمینی بر سطح زمین با وجود عارضه توپوگرافی به شکل دره پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان‌دهنده اثرات متقابل این عوارض بر یکدیگر نسبت به حالت منفرد هرکدام از این سازه‌ها می‌باشد [۱۵ و ۱۶]. یکی از متروهای شناخته شده که توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته، ایستگاه مترو دایکای در ژاپن می‌باشد که در سال ۱۹۶۲ با استفاده از روش کند و پوش ساخته شده بود. این سازه در طی زلزله ویرانگر ۱۹۹۵ کوبه آسیب جدی دید. همین مسأله موجب شد تا رفتار لرزه‌ای آن مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد [۱۷]. در سال ۲۰۱۹ ژو<sup>۴</sup> و همکاران با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، به مطالعه پارامتری رفتار لرزه‌ای این سازه پرداختند. ایشان پارامترهای مختلفی از جمله، جنس مصالح خاک اطراف سازه، چگالی بتن سازه، اعمال همزمان مؤلفه‌های افقی و قائم رکوردهای زلزله را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تغییر چگالی سازه تأثیر چندانی در تغییر مکان جانبی سازه ندارد و این رفتار متأثر از جنس مصالح خاک اطراف سازه نیز می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، مشخص شد که اثرات تغییرات مکانی زمین‌لرزه روی ساختگاه با وجود سازه زیرزمینی مترو چندان مورد توجه محققین قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر، این پدیده با اعمال تحریک‌های یکنواخت و غیریکنواخت به‌عنوان ورودی روی ساختگاه خاک لایه‌بندی شده با وجود سازه مترو و بدون آن بررسی شد. برای این منظور، ساختگاه شناخته شده دایکای در کشور ژاپن در نظر گرفته شده است. برای تولید شتاب‌های غیریکنواخت تکیه‌گاهی از روش شناخته شده ارتعاش تصادفی برمبنای چگالی طیف توان و طیف

شد [۲]. سازه‌های بزرگ و طویل مانند پل‌ها، سدها و تونل‌ها که دارای گستردگی تماسی زیادی با سطح زمین هستند ممکن است تغییرات عمده در دامنه و فاز تحریک در تکیه‌گاه‌های مختلف تجربه کنند. تفرق امواج لرزه‌ای و تشدید آنها توسط نامنظمی‌های موجود در ساختگاه نقش مهمی در تشدید جابه‌جایی‌ها دارد [۳-۵]. استفاده از تحریک یکنواخت برای چنین سازه‌هایی همانند سدها، پل‌ها و تونل‌ها چندان منطقی نیست. یکی از سازه‌های حساس زیرزمینی، مترو می‌باشد. این سازه‌ها به دلیل اینکه معمولاً در شهرهای پرجمعیت و در زیر مراکز تجاری و اقتصادی ساخته می‌شود، از اهمیت و حساسیت فراوانی برخوردار می‌باشند [۶ و ۷]. یکی از نکاتی که در این قبیل سازه‌ها باید در نظر گرفته شود این است که به دلیل اینکه در اعماق زیاد ساخته نمی‌شوند، بر روی سازه‌های روزمینی تأثیرگذار خواهند بود [۸]. این پدیده تحت عنوان بزرگنمایی<sup>۱</sup> ناشی از تفرق امواج لرزه‌ای در اثر برخورد با این سازه‌ها شناخته می‌شود. این پدیده تاکنون توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله آنها می‌توان به تحقیقات بازاریار<sup>۲</sup> و همکاران اشاره کرد. ایشان در مطالعات خود با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و آزمایش روی نمونه‌های ساخته شده با وجود تونل و بدون تونل، بزرگنمایی ناشی از اثرات وجود سازه روی سطح زمین تحت شتاب‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که وجود سازه زیرزمینی موجب تقویت تحریک ورودی با پیوندهای بلند و تضعیف تحریک ورودی با پیوند کوتاه می‌شوند [۹ و ۱۰].

علی‌الهی<sup>۳</sup> و همکاران نیز با استفاده از روش عددی المان مرزی توسعه داده شده در حوزه زمان به مطالعه پارامتری اثرات حفره‌های زیرزمینی روی بزرگنمایی ایجاد شده در سطح زمین پرداختند. ایشان در مطالعه خود

1- amplification  
2- Baziar  
3- Alielahi

4- Xu

انتقال روی یک سطح از رابطه (۴) که براساس تئوری انتشار امواج برشی نوشته شده، استفاده می‌شود:

$$H_i(i\omega) = \frac{(1+r_i - i\xi_i) \exp(-i\omega\tau_i(1-2i\xi_i))}{1+(r_i - i\xi_i) \exp(-2i\omega\tau_i(1-2i\xi_i))} \quad (4)$$

در این رابطه  $\xi_i$  نسبت میرایی،  $\tau$  زمان عبور موج و  $r$  ضریب انعکاس موج می‌باشد. اختلاف فاز بین تحریک دو نقطه  $i$  و  $j$  با توجه به عبور موج در ساختگاه از رابطه (۵) تعیین می‌شود:

$$\theta_i(\omega) - \theta_j(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(H_i(i\omega)H_j^*(i\omega))}{\text{Re}(H_i(i\omega)H_j^*(i\omega))} \quad (5)$$

ماتریس چگالی طیف توان  $S(i\omega)$  یک ماتریس هرمیتی می‌باشد، که براساس رابطه (۶)، به صورت حاصل ضرب دو ماتریس پایین‌مثلثی در ماتریس هرمیتی آن نوشته می‌شود:

$$S(i\omega) = L(i\omega)L^H(i\omega) \quad (6)$$

تجزیه این ماتریس با استفاده از روش چولسکی انجام و سپس درایه‌های ماتریس پایین‌مثلثی به صورت معادله (۷) نوشته می‌شود:

$$L(i\omega) = \begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ L_{21}(i\omega) & L_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}(i\omega) & L_{n2}(i\omega) & \dots & L_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_{ii}(\omega) = \left[ S_{ii}(\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{ik}^*(i\omega) \right]^{1/2} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

ارتباطی استفاده گردید [۲۰]. در این مطالعه، مواردی شامل مقایسه بزرگنمایی ایجاد شده ناشی از حضور سازه در سطح زمین، پیک شتاب‌های ایجاد شده در روی سطح و روی لایه‌های زمین تشکیل‌دهنده اطراف سازه تحت دو بارگذاری یکنواخت<sup>۵</sup> و غیریکنواخت<sup>۶</sup> بررسی شد.

## ۲- روش ارتعاش تصادفی

تحریک متفاوت زمین‌لرزه بر روی یک بستر سنگی به صورت یک فرایند مانا با میانگین صفر که دارای تابع چگالی طیف توان مشابه می‌باشد، فرض می‌شود. این فرض با توجه به فاصله زیاد منبع تا ساختگاه که معمولاً از ابعاد سازه بزرگتر است، منطقی به نظر می‌رسد. تابع چگالی طیف توان متقاطع برای تحریک زمین‌لرزه برای یک ساختگاه در  $n$  تکیه‌گاه به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود [۲۰]:

$$S(i\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(i\omega) & \dots & S_{1n}(i\omega) \\ S_{21}(i\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & S_{2n}(i\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1}(i\omega) & S_{n2}(i\omega) & \dots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه  $S_{ij}(i\omega)$  و  $S_{ii}(\omega)$ ، به ترتیب تابع چگالی طیف توان متقاطع و تابع چگالی طیف توان خود ارتباطی می‌باشند، که از روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شوند:

$$S_{ii}(\omega) = |H_i(i\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (2)$$

$$S_{ij}(i\omega) = H_i(i\omega)H_j^*(i\omega)S_g(\omega)\gamma_{ij}(d_{ij}, i\omega) \quad (3)$$

در این روابط  $H_j(i\omega)$  و  $H_i(i\omega)$  عبارتند از: تابع انتقال بین دو تکیه‌گاه،  $S_g(\omega)$  تابع چگالی طیف توان تحریک زمین و  $\gamma_{ij}$  تابع طیف ارتباطی بر روی بستر سنگی در تحریک متفاوت تکیه‌گاهی. برای تعیین تابع

<sup>5</sup>- Uniform Excitation

<sup>6</sup>- Non-Uniform Excitation

محاسبه تابع چگالی طیفی توان متقاطع بین نقاط تکیه‌گاهی نیاز داریم.

$$f_i(t) = \zeta(t)u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp[-0.155(t-t_n)], & t_n < t \leq T \end{cases} \quad (13)$$

ارتباط بین توابع چگالی طیف توان متقاطع و خود ارتباطی ما بین دو تکیه‌گاه  $n$  و  $m$  به صورت رابطه (۱۴) توسط تابع ارتباطی بیان می‌شود:

$$S_{mn}(d, \omega) = S_g(\omega)\gamma_{mn}(\omega) \quad (14)$$

برای تعریف  $S(\omega)$  از طیف اصلاح شده کانای-تاجیمی استفاده می‌شود. کانای و تاجیمی رابطه‌ای به شکل معادله (۱۵) را برای محاسبه چگالی طیف توان ارائه کرده‌اند [۲۰].

$$S_g(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \times \frac{1 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (15)$$

در رابطه بالا  $\Gamma$  بزرگی تحریک سنگ بستر،  $\omega_g$  فرکانس مرکزی،  $\omega_f$  فرکانس مربوط به فیلتر بالاگذر،  $\xi_g$  نسبت میرایی و  $\xi_f$  پارامترهای مربوط به خاک محیط می‌باشند، که برای بیان شرایط محیطی در انتشار امواج به کار می‌رود. در پژوهش حاضر،  $\omega_g = 10\pi \text{ (rad/s)}$ ،  $\xi_g = \xi_f = 0.6$  و همچنین مقدار  $\omega_g = 0.5\pi \text{ (rad/s)}$  و همچنین مقدار  $\Gamma = 0.022 \text{ (m}^2/\text{s}^3)$  در نظر گرفته شده است [۲۰].

تابع طیف ارتباطی بین دو ایستگاه با فرض سرعت انتشار موج C از رابطه (۱۶) تعیین می‌شود.

$$\gamma_{mn}(d, \omega) = |\chi(d, \omega)| e^{-i\omega d/c} \quad (16)$$

$$L_{ij}(i\omega) = \frac{S_{ij}(i\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{jk}^*(i\omega)}{S_{ij}(\omega)} \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, i$$

در روابط (۸) و (۹) علامت \* نشان دهنده تابع مزدوج مختلط و  $S_{ij}(i\omega)$  تابع چگالی طیف توان متقاطع می‌باشد. بعد از تعیین درایه‌های ماتریس مثلثی، سری‌های زمانی برای تکیه‌گاه‌های مختلف با استفاده از رابطه (۱۰) تعیین می‌شود:

$$u_i(t) = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^N A_{im}(\omega_n) \cos \left[ \omega_n t + \beta_{im}(\omega_n) + \varphi_{mn}(\omega_n) \right] \quad (10)$$

در این رابطه  $A_{im}(\omega)$  برابر دامنه و  $\beta_{im}(\omega)$  فاز سری زمانی تولید شده می‌باشند که براساس معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردند.  $\varphi_{mn}(\omega_n)$  فاز تصادفی و  $n$  تعداد فرکانس‌های گسسته شده می‌باشد [۲۰].

$$A_{im}(\omega) = \sqrt{4\Delta\omega} |L_{im}(i\omega)| \quad (11)$$

$$0 \leq \omega \leq \omega_N$$

$$\beta_{im}(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[L_{im}(i\omega)]}{\text{Re}[L_{im}(i\omega)]} \right) \quad (12)$$

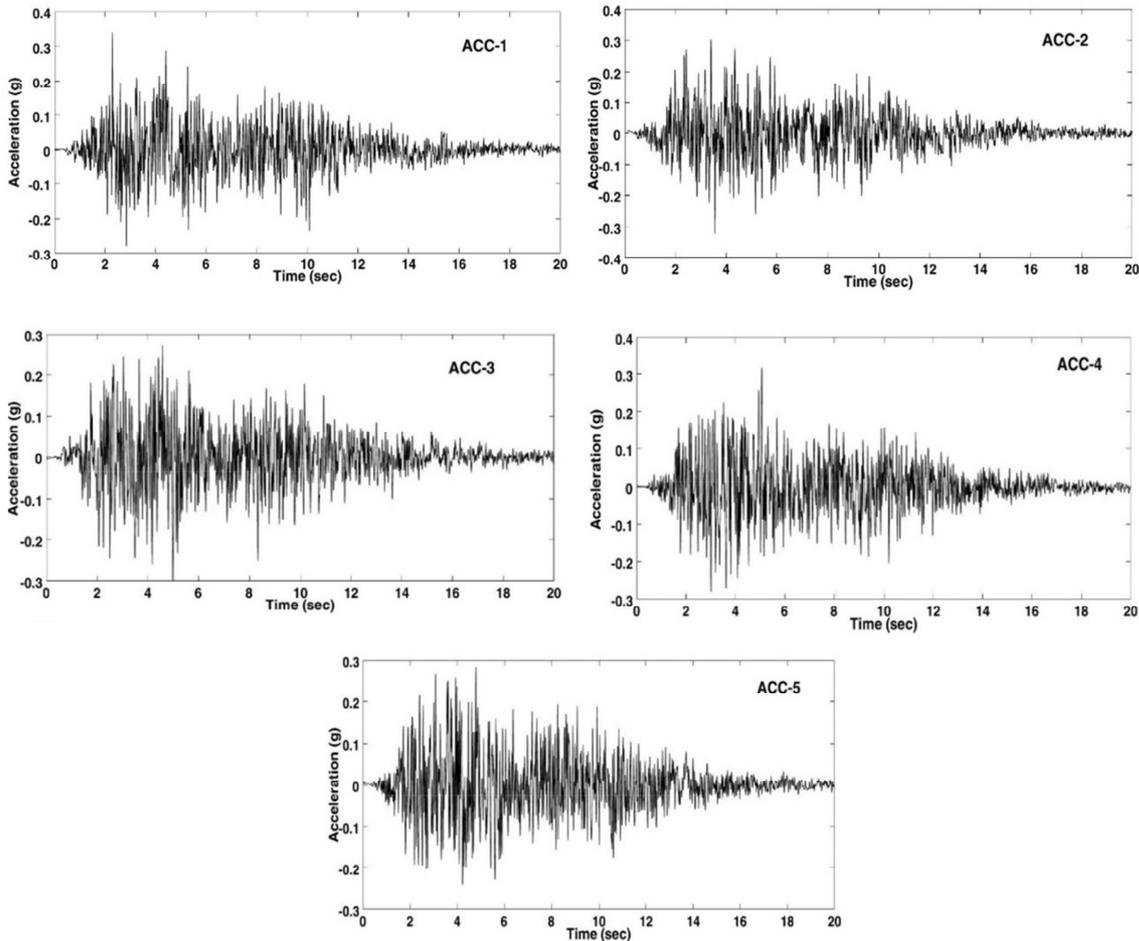
$$0 \leq \omega \leq \omega_N$$

سری زمانی تولید شده با استفاده از این روش یک فرایند مانا می‌باشد. به منظور دست‌یابی به سری‌های زمانی غیرمانا در نقاط مختلف ساختگاه از تابع پوش جنینگ<sup>۷</sup> با فرض  $t_0=2s$  و  $t_n=10s$  به صورت معادله (۱۳) استفاده می‌شود. در این رابطه،  $\zeta(t)$  تابع پوش جنینگ و  $u_i(t)$  تابع سری زمانی تولید شده می‌باشد. همانگونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، در روش‌های ارتعاش تصادفی برای محاسبه تحریک متفاوت تکیه‌گاهی به

<sup>7</sup>- Jennings envelope function

در شکل ۱ شتاب‌های تولید شده براساس روش ارتعاش تصادفی ارائه شده است.

بخش نمایی رابطه (۱۶) نشان‌دهنده اثرات عبور موج یا تأخیر زمانی و  $|\gamma(d, \omega)|$  تابع کاهش ارتباطی می‌باشد.



شکل ۱- شتاب‌نگاشت‌های تولید شده با روش ارتعاش تصادفی

استفاده نمود و معمولاً از مرز ویسکوز که توسط کوهلمیر و لایسمر<sup>۸</sup> در سال ۱۹۶۹ معرفی شده استفاده می‌شود. در این روش، میراگرها به‌طور مستقل به مرز در جهات عمودی و برشی متصل می‌شوند [۱۸]. جهت حذف موج‌های ناشی از حرکت میدان آزاد در پاسخ سازه، میراگرهای ذکر شده در FLAC به ستون‌های مجازی که قابلیت شبیه سازه حرکت میدان آزاد را دارند متصل می‌شوند. این کار باعث می‌شود که میراگرها موج برگشتی ناشی از سازه را به‌خوبی جذب نمایند. برای افزایش میزان دقت نتایج تحلیل عددی در مدل‌های ساخته شده، فاصله

### ۳- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

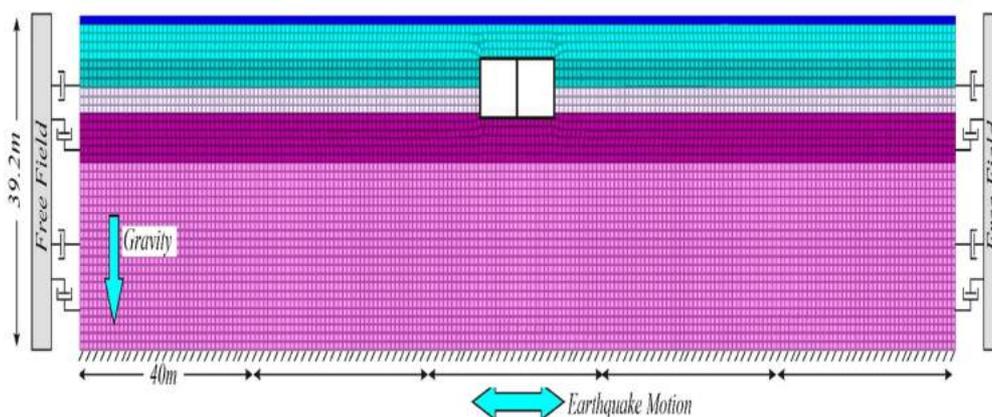
مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود سه بعدی توسط نرم افزار FLAC 3D صورت گرفته است. در شکل ۲ لایه‌های خاک به‌همراه مش‌بندی صورت گرفته در آن نشان داده شده است. جهت تعریف تنش‌های ناشی از وزن خاک به مدل از روش Gravity Loading در حالت استاتیکی استفاده شده است. در این تحلیل از تکیه‌گاههای غلطکی برای مرزهای قائم و مفصلی برای کف مدل استفاده گردیده است.

در حالت دینامیکی دیگر نمی‌توان از این مرزها که باعث انعکاس موج‌ها به داخل مدل‌سازی می‌شوند،

<sup>8</sup>- Kuhlemeyer and Lysmer

نمایش درست انتقال موج از میان یک مدل، اندازه المان باید کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بیشترین فرکانس موج ورودی  $\lambda_s$  که در رابطه (۱۷) نشان داده شده است، باشد.

میان مرزهای آزاد به اندازه کافی از ناحیه مورد توجه دور قرار داده شده است تا تاریخچه زمانی شتاب دریافتی در سطح زمین برابر تاریخچه شتاب حرکت میدان آزاد باشد. فرکانس موج ورودی و مشخصات سرعت برشی مصالح، دقت عددی انتقال موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای



شکل ۲- هندسه، لایه‌بندی، مش‌بندی و شرایط مرزی مدل

فنرهایی که دارای سختی مشخصی هستند مدل‌سازی می‌شود.

در اینجا فرض شده است که در راستای عمودی به‌طور کامل امکان جدایش وجود داشته و در راستای برشی، ماهیت انتقال نیرو به‌صورت اصطکاکی بوده و ضریب اصطکاک  $0/4$  برای آن در نظر گرفته شده است. رفتار خاک در حالت الاستیک به‌صورت الاستیک مدل شده و در حالت دینامیکی جهت شبیه‌سازی رفتاری دوره‌ای خاک از مدل Hysteretic Damping استفاده شده است. در این مدل، منحنی  $G/G_{max}$  در برابر کرنش برشی می‌تواند توسط تابع (۱۸) تعریف شود:

$$M_S(\gamma) = \frac{G_r}{G_{max}} = s^2(3-2s) \quad (18)$$

این تابع، شیب منحنی تنش برشی- کرنش برشی به‌متناظر با کرنش برشی تولید شده در مدل می‌باشد. در این رابطه،  $G_r$  مدول برشی متناظر با کرنش برشی تولید شده در خاک،  $G_{max}$  مدول برشی خاک در کرنش‌های کوچک و  $s$  برابر رابطه (۱۹) است:

$$\lambda_s = \frac{V_s}{f_{max}} \quad (17)$$

در این رابطه،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $f_{max}$  متناظر با حداکثر فرکانس موج ورودی قابل تأثیر در تحلیل لرزه‌ای می‌باشد. حداقل سرعت موج برشی در این ساختگاه برابر  $140$  متر بر ثانیه و  $f_{max}$  نیز  $25$  هرتز در نظر گرفته شده که اندازه‌مش‌ها را بین  $0/56$  تا  $0/7$  متر تعیین می‌نماید که در اینجا  $0/6$  متری انتخاب شده است. مشخصات لایه‌های خاک در جدول ۱ ارائه شده است. ابعاد مدل چنانکه در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد، برابر  $200$  متر طول و  $39/2$  متر عرض می‌باشد. به‌دلیل اینکه از اثرات مرزهای انتهایی بر پاسخ‌های حاصل شده جلوگیری شود این ابعاد انتخاب شده است [۱۸].

جهت شبیه‌سازی سازه ایستگاه از المان‌های سازه‌ای خطی استفاده شده است. این نوع المان سازه‌ای قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌هایی است که دارای ضخامت قابل توجهی بوده و نمی‌توان از جدایش بین سازه و خاک صرف‌نظر نمود. فصل مشترک بین خاک و سیستم خطی هم در راستای برشی و هم در راستای عمودی توسط

رابطه (۲۰) قابل تعریف است:

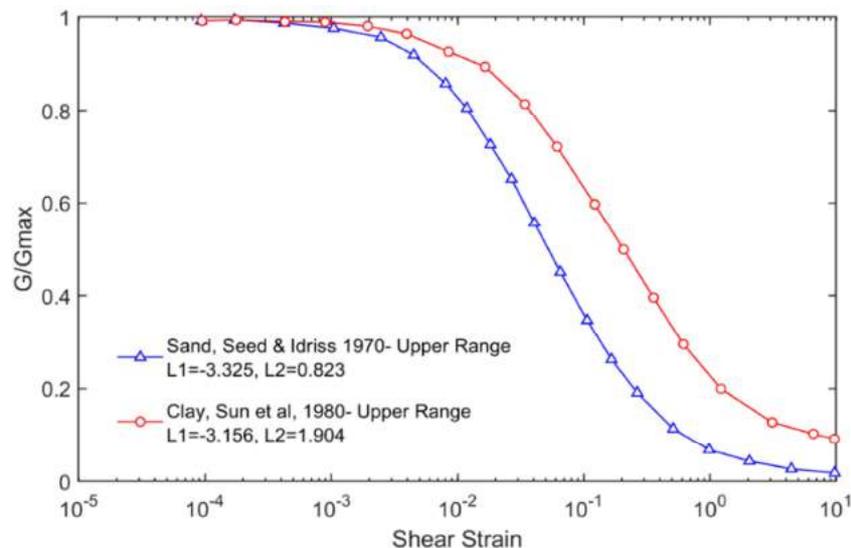
$$\bar{\tau} = M_s \gamma \quad (20)$$

$$s = \frac{L_2 - L}{L_2 - L_1} \quad (19)$$

در این رابطه  $L_1$  و  $L_2$  پارامترهای متناسب با نوع منحنی مورد استفاده بوده که برای رس و ماسه متفاوت می‌باشد و  $L$  برابر لگاریتم کرنش برشی تولید شده در خاک می‌باشد. با داشتن  $M_s(\gamma)$  و  $\gamma$ ، رابطه تنش و کرنش به صورت

جدول ۱- مشخصات لایه‌های خاک در ایستگاه دایکای [۱۸]

نسبت پواسون	سرعت موج برشی (m/s)	چگالی ( $t/m^3$ )	ضخامت (m)	خاک	لایه
۰/۳۳۳	۱۴۰	۱/۹	۱	رس	۱
۰/۴۸۸	۱۴۰	۱/۹	۴/۱	شن	۲
۰/۴۹۳	۱۷۰	۱/۹	۳/۲	شن	۳
۰/۴۹۴	۱۹۰	۱/۹	۳/۱	رس	۴
۰/۴۹۰	۲۴۰	۱/۹	۵/۸	رس	۵
۰/۴۸۷	۳۳۰	۲	۲۲	شن	۶



شکل ۳- منحنی‌های مدول برشی نرمال شده با مدول برشی حداکثر به کرنش برشی برای خاک رس و ماسه

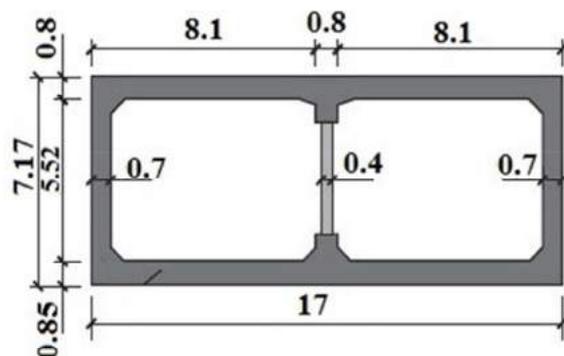
کوبه و در مطالعه حاضر برابر ۲۱ میلی‌متر می‌باشد. هندسه سازه ایستگاه و نمودار تغییرمکان نسبی سازه تحت زلزله کوبه در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج تحلیل عددی

در این بخش به مقایسه اثرات حضور سازه روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین در دو حالت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت پرداخته

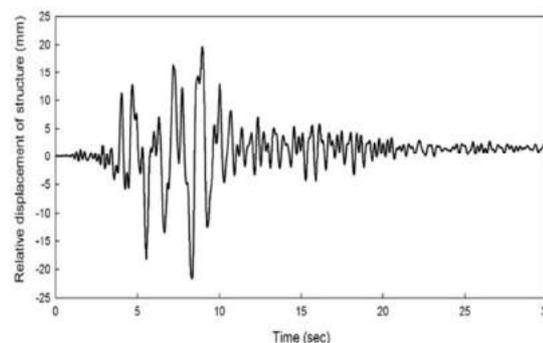
منحنی‌های مدول برشی نرمال شده با مدول برشی حداکثر به کرنش برشی برای خاک رس و ماسه براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در ادبیات فنی در شکل ۳ نشان داده شده و پارامترهای مدل معرفی شده نیز در این شکل آورده شده است. جهت صحت‌سنجی مدل تهیه شده از نتایج ارائه شده توسط محققان در سال ۲۰۱۹ استفاده شد [۱۸]. جابه‌جایی نسبی بین بالا و پایین ستون وسط، در مطالعه ایشان ۲۰ میلی‌متر تحت زلزله

سطح زمین می‌باشد. این اثرات، به‌خصوص برای سازه‌ای مانند مترو که در عمق کم نسبت به سطح زمین ساخته می‌شود، بیشتر نمایان می‌گردد.



(الف)

می‌شود. چنانکه اشاره شد، یکی از اثرات پدیده تفرق امواج لرزه‌ای ناشی از سازه زیرزمینی، ایجاد بزرگنمایی و در بعضی نقاط کوچکنمایی در قسمت‌های مختلف در



(ب)

شکل ۴- هندسه سازه ایستگاه و تغییرمکان نسبی سازه در بالا و پایین ستون وسط

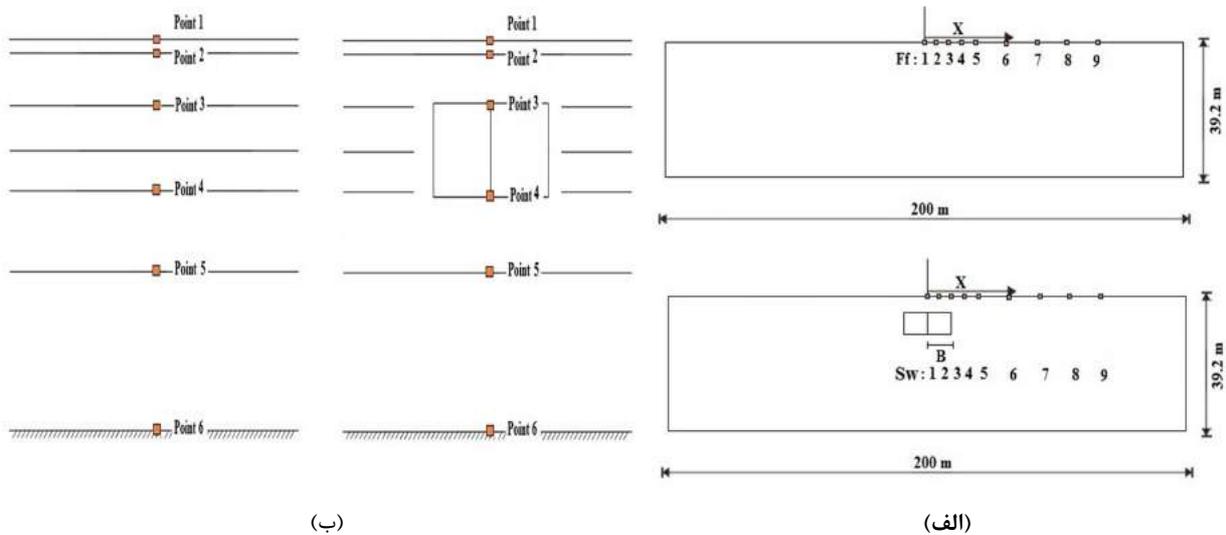
(۲۱) استفاده گردید. استفاده از میرایی و طیف تغییرمکان برای محاسبه بزرگنمایی منجر به هموارتر شدن نتایج می‌شود [۲۱].

$$Amp_{S,F}(\omega) = \frac{SD_{subway}(\omega)}{SD_{Free\ field}(\omega)} \quad (21)$$

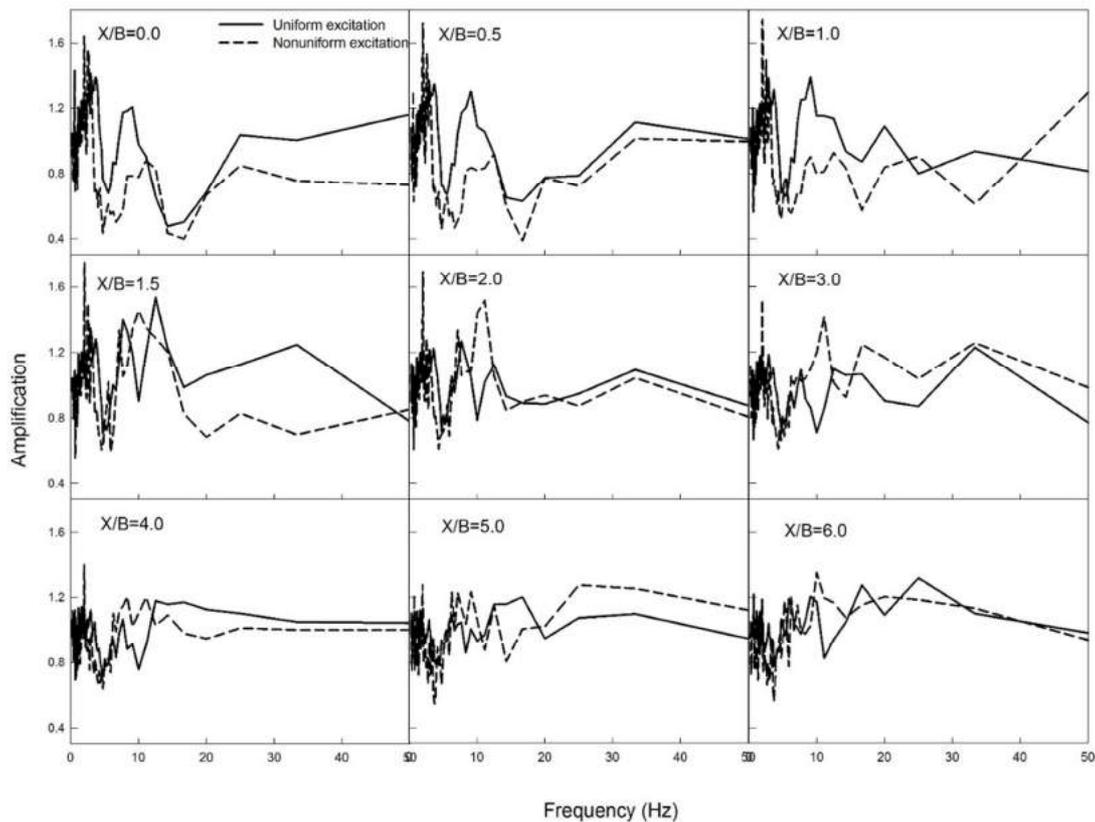
در این رابطه  $Amp$  نشان‌دهنده بزرگنمایی و  $SD$  طیف پاسخ جابه‌جایی نقاط مختلف روی سطح زمین می‌باشد. برای بررسی اثرات سازه روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین در دو حالت تحلیل‌های غیریکنواخت و یکنواخت، مدل‌های مختلفی بدون وجود سازه و همچنین با حضور سازه تهیه شد. در شکل ۵ مکان قرارگیری نقاط مختلف مورد مطالعه روی سطح زمین و بر روی لایه‌های تشکیل‌دهنده خاک اطراف سازه ارائه شده است. روی سطح زمین ۹ نقطه در فواصل بی‌بعد  $X/B$  برابر صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در نظر گرفته شده است. در این رابطه  $X$  فاصله روی محور افقی و  $B$  نصف بعد عرض سازه می‌باشد. علاوه بر این، روی لایه‌های تشکیل‌دهنده زمین نیز در دو حالت بدون سازه و با وجود آن، ۶ نقطه مطابق شکل ۵ برای بررسی این پدیده، تعریف شده است. در شکل ۶ بزرگنمایی (نسبت طیف جابه‌جایی) در دو حالت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت، روی نقاط مختلف

سازه زیرزمینی که در مسیر امواج قرار می‌گیرد، به‌عنوان مانع در مقابل آنها عمل کرده، امواج را جذب و سپس منعکس می‌کند، که می‌تواند در بعضی نقاط اثرات کاهشی و در بعضی نقاط نیز اثرات افزایشی (تشدید) داشته باشد. یکی از اهداف پژوهش انجام شده بررسی اثرات وجود سازه بر تفرق امواج لرزه‌ای تولید شده با استفاده از روش ارتعاش تصادفی می‌باشد. این امواج در دو حالت به محیط برخورد داده می‌شود. ابتدا تمام نقاط در کف مدل تحت شتاب  $ACC1$  که دارای پیک شتاب  $0.34g$  می‌باشد قرار داده می‌شود. سپس کف مدل به فواصل ۴۰ متری تقسیم و تحت شتاب‌های اشاره شده در شکل ۱، به ترتیب  $ACC1$  تا  $ACC5$ ، قرار داده می‌شود. بدین ترتیب اثرات تحلیل‌های یکنواخت و غیریکنواخت لرزه‌ای روی مدل بررسی می‌گردد. برای اینکه بتوانیم بزرگنمایی را در هرکدام از حالت‌ها جداگانه داشته باشیم، تحلیل‌های یکنواخت روی مدل ساخته شده بدون وجود سازه و با وجود سازه با یکدیگر و همچنین برای تحلیل غیریکنواخت نیز مشابه حالت یکنواخت بررسی شد. برای محاسبه تابع بزرگنمایی از نسبت طیف پاسخ تغییرمکان در مدل با وجود سازه به مدل بدون حضور سازه با مقادیر میرایی مناسب (به عنوان مثال ۵ درصد)، براساس رابطه

در سطح زمین ارائه شده است.



شکل ۵- نمایش شماتیک از مقطع عرضی ایستگاه دایکای، (الف) نقاط روی سطح زمین و (ب) نقاط روی لایه‌های داخلی

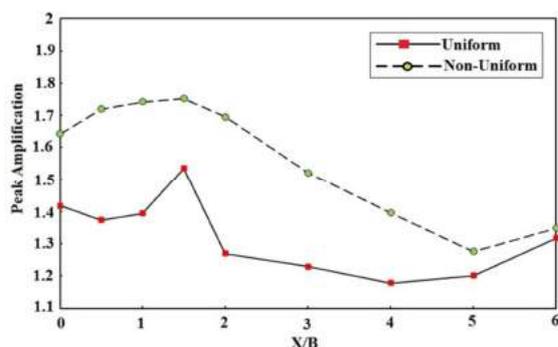


شکل ۶- نسبت طیف جابه‌جایی در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت دو ورودی یکنواخت و غیریکنواخت

هرچند در این فاصله نیز به‌خصوص در فرکانس‌های کمتر از ۵ هرتز، تحریک غیریکنواخت، بزرگنمایی بیشتری را موجب شده است. تا محدوده فرکانس ۲۰ هرتز در هر دو ورودی، نمودارها نوسانات بیشتری را نشان می‌دهند. چنانکه قابل مشاهده است، در محدوده فرکانسی کمتر از

چنانکه در شکل ۶ قابل مشاهده است، الگوی بزرگنمایی‌های به‌دست آمده در حالت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت تفاوت زیادی به‌خصوص با افزایش فاصله از سازه، نشان نمی‌دهد. نقاط تا فاصله  $X/B$  برابر  $1/5$  نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تحریک یکنواخت می‌باشد.

است. قابل مشاهده است که، پاسخ حداکثر در نزدیکی نقاط لبه سازه اتفاق افتاده، که نشان‌دهنده اثرات لبه بر امواج رسیده به متروی دایکای می‌باشد. در مراجع مختلف نیز به این نکته اشاره شده که در نزدیکی لبه سازه اثرات تفرق امواج لرزه‌ای، تشدید می‌شود [۲۲].



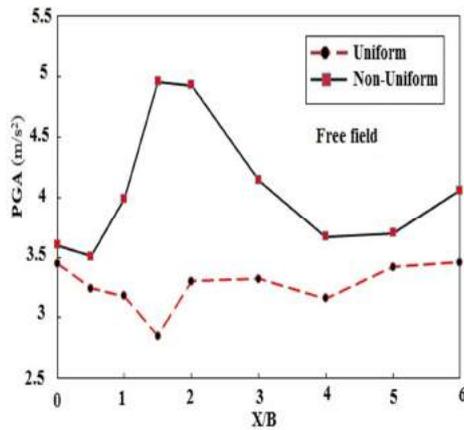
شکل ۷- حداکثر بزرگنمایی در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت ورودی‌های یکنواخت و غیریکنواخت

در تحقیق انجام شده توسط سان<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ روی ساختگاه متروی دایکای، حداکثر بزرگنمایی در نزدیکی لبه سازه به مقدار ۱/۴ تحت شتاب واقعی کوبه و به شکل ورودی یکنواخت محاسبه شد [۲۲]. نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر، تحت تحریک غیریکنواخت در مقایسه با نتایج سان و همکاران که از شتاب واقعی به صورت یکنواخت روی مدل دوبعدی برای انجام تحقیق خود استفاده کردند، افزایش ۲۵ درصد را نشان می‌دهد. مقایسه حداکثر بزرگنمایی در دو حالت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت، نشان‌دهنده اثرات تحریک غیریکنواخت روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین ناشی از وجود سازه و در نتیجه افزایش حداکثر بزرگنمایی نسبت به حالت یکنواخت شده است. با افزایش فاصله از سازه، بزرگنمایی در هر دو ورودی یکنواخت و غیریکنواخت به هم نزدیک شده‌اند. در شکل ۸ مقادیر شتاب‌های حداکثر در دو حالت یکنواخت و غیریکنواخت، روی مدل با سازه و مدل بدون سازه ارائه شده است. در حالت بدون سازه، در محدوده فاصله بین ۱

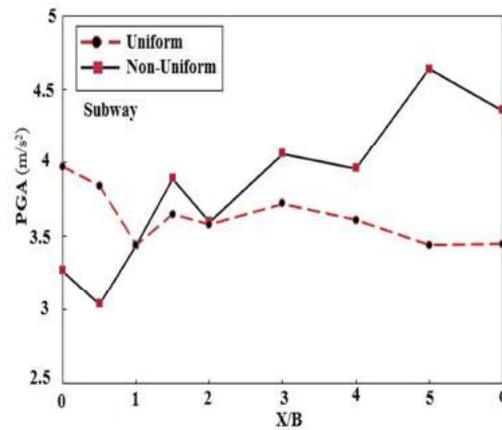
۲۰ هرتز برای هر دو ورودی، کوچکنمایی و بزرگنمایی در سطح زمین، تجربه شده است. مشاهده پدیده بزرگنمایی یا کوچکنمایی در سطح زمین در هر دو ورودی، نشان‌دهنده اثرات کاهندگی و افزایشی سازه بر انتشار امواج می‌باشد. هرچه به نقاط مجاور سازه نزدیک می‌شویم، نوسانات نمودارها بیشتر شده و الگوهای ارائه شده از پیچیدگی بیشتری برخوردار می‌شوند که می‌تواند نشان‌دهنده اثرات لبه بر تفرق امواج باشد. هرچه به انتهای مدل نزدیک می‌شویم و با افزایش فرکانس، الگوی نمودارها هموارتر شده و تحلیل‌های یکنواخت و غیریکنواخت به یکدیگر و همچنین به حالت بدون سازه انطباق بیشتری را نشان می‌دهند. چنانکه در مراجع مختلف توسط محققین مورد اشاره قرار گرفته در صورتی که طول موج ورودی بیشتر از ۶ برابر ابعاد سازه باشد، اثرات بزرگنمایی و تفرق امواج ناشی از سازه زیرزمینی چندان قابل توجه نیست، اما در صورتی که طول موج ورودی و ابعاد سازه به هم نزدیک باشند (به خصوص در خاک‌های نرم که سرعت موج برشی کمتر است)، اثرات تفرق امواج از سازه زیرزمینی قابل توجه خواهد بود [۲۲]. علت شباهت زیاد بین الگوهای بزرگنمایی ارائه شده، در شکل ۶ تحت دو ورودی مختلف، این است که برای ورودی یکنواخت و غیریکنواخت از نسبت طیف تغییرمکان در سطح زمین با وجود سازه، به ترتیب از نسبت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت مدل بدون سازه استفاده شد. تفاوت عمده بین پاسخ‌های سطح زمین در این دو نوع تحلیل در نمودارهای حداکثر بزرگنمایی و شتاب‌های ثبت شده روی نقاط مختلف در سطح زمین تحت دو ورودی یکنواخت و غیریکنواخت که در شکل‌های ۷ و ۸ در ادامه ارائه می‌شود، نمایان است. چنانکه در شکل ۷ قابل مشاهده است، بیشترین مقدار بزرگنمایی تحت ورودی غیریکنواخت در نقطه ۱/۵، نزدیک‌ترین نقطه مجاور لبه سازه و به مقدار ۱/۷۵ تجربه شده است. بیشترین درصد افزایش بزرگنمایی نسبت به حالت یکنواخت در نقطه ۲ به میزان ۳۳ درصد مشاهده شده

<sup>۹</sup>- Sun

که تغییرات حداکثر شتابها در حالت بدون سازه در مقایسه با وجود سازه در خاک در ورودی غیریکنواخت بیشتر می‌باشد.



(ب)

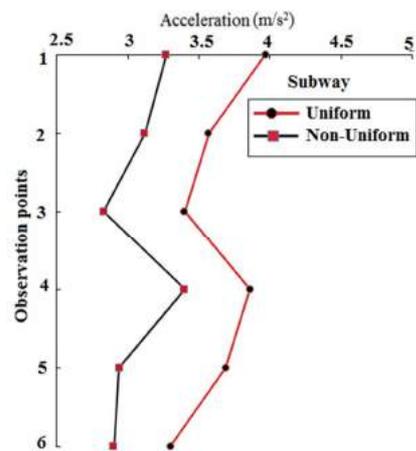


(الف)

شکل ۸- حداکثر شتاب در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت ورودی‌های یکنواخت و غیریکنواخت، (الف) مدل با مترو، (ب) مدل بدون مترو

به گونه‌ای که شیب افزایش در تحلیل یکنواخت بیشتر است. در بین نقاط ۲ تا ۶ که زیرزمین می‌باشند، نقطه ۴ در هر دو تحلیل بیشترین شتاب را تجربه کرده است. این رفتار را می‌توان اینگونه توجیه کرد که این نقطه که در تماس با مترو و در زیر آن قرار دارد، به دلیل گیر کردن امواج در زیر سازه، کاهش سرعت امواج در لایه ۵ که موجب کاهش طول موج برخوردی نسبت به ابعاد مترو و همچنین تفرق امواج در آن نقطه موجب بروز این رفتار شده است. همچنین جذب امواج توسط سازه و انعکاس آن به سمت لایه‌های بالا موجب افزایش تدریجی شتاب تا سطح زمین شده است. البته در هر دو حالت در نقطه ۳ کاهش شتاب مشاهده شده است، که می‌تواند به دلیل اثر مانع‌شوندگی سازه در رسیدن امواج به آن نقطه باشد. قابل مشاهده است که نحوه اعمال بار ورودی در کنار سایر پارامترها از جمله خصوصیات هندسی و جنس مصالح خاک از عوامل مهم و تأثیرگذار در پاسخ‌های مشاهده شده از میزان اثرگذاری وجود و عدم وجود سازه می‌باشد. یکی از پارامترهای مورد توجه توسط اکثر محققین

در ادامه تحلیل‌های انجام شده، شتاب‌های حداکثر ایجاد شده بین لایه‌ها، در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- مقایسه حداکثر شتاب در نقاط مختلف روی لایه‌های خاک اطراف سازه

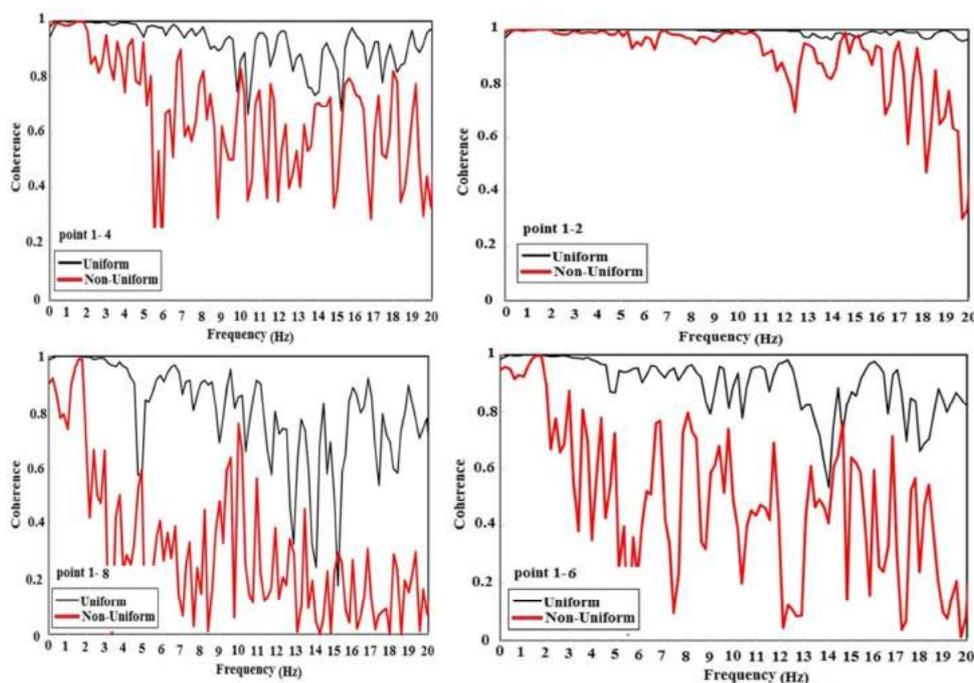
مقایسه بین شتاب‌های حداکثر تحت دو حالت یکنواخت و غیریکنواخت، نشان‌دهنده این است که در ورودی یکنواخت بین لایه‌های زمین شتاب‌های بزرگتری ایجاد شده است. شتاب حداکثر از پایین‌ترین نقطه در کف تا سطح زمین به غیر از نقطه ۳ که در بالا و در تماس با سازه می‌باشد، در هر دو تحلیل افزایش را نشان می‌دهد؛

در این رابطه،  $S$  چگالی طیف توان و  $\gamma$  طیف ارتباط بین زوج نقاط می‌باشد.

شکل ۱۰، طیف ارتباط بین نقطه  $(X/B=0)$  به‌عنوان شروع و نقاط ۲  $(X/B=0.5)$ ، ۴  $(X/B=1.5)$ ، ۶  $(X/B=3)$  و ۸  $(X/B=5)$  در فواصل مختلف روی سطح زمین بدون وجود سازه را نشان می‌دهد. چنانکه در این شکل مشاهده می‌شود، از منظر فاصله نقاط از سازه، محدوده فرکانسی مؤثر و اثرات نحوه بارگذاری قابل بحث می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در هر نمودار ارائه شده بین دو نقطه، طیف ارتباط در بارگذاری غیریکنواخت دارای الگوی پیچیده‌تر و همچنین نوسانات و پیک‌های بیشتری می‌باشد. افزایش فرکانس، موجب افزایش نوسانات در طیف ارتباط بین زوج نقاط در هر دو حالت شده، ولی چنانکه اشاره شد این نوسانات در بارگذاری غیریکنواخت افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این قابل مشاهده است که با افزایش فاصله نقاط از یکدیگر از میزان طیف ارتباط در هر دو وضعیت کاسته شده و تأثیر افزایش فاصله روی بارگذاری غیریکنواخت بیشتر نمایان می‌باشد.

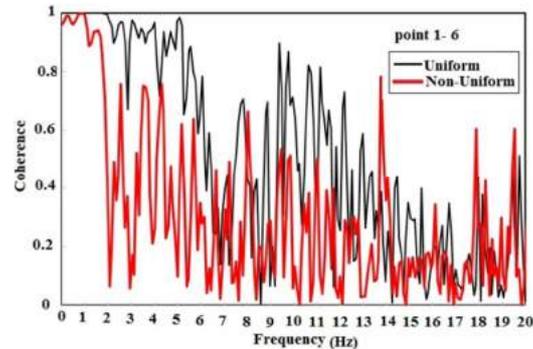
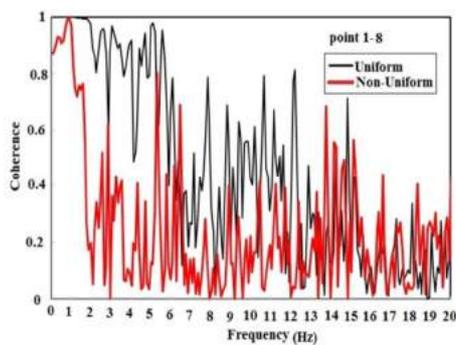
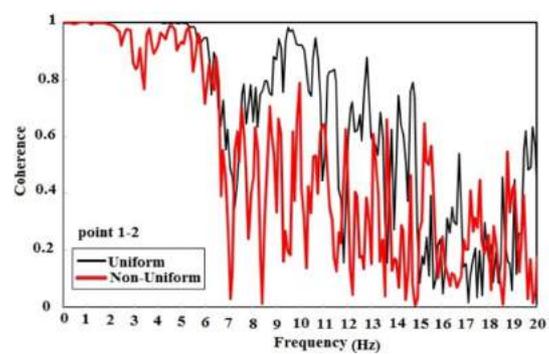
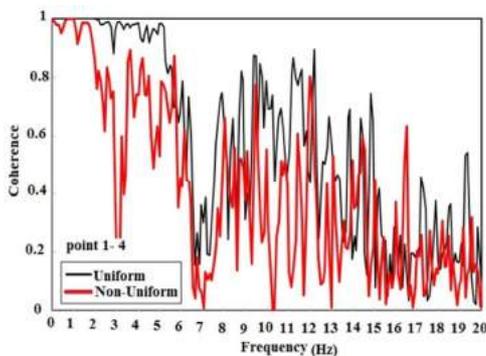
روی شتاب‌های ثبت شده در سطح زمین در طی یک زمین‌لرزه، طیف ارتباط بین شتاب‌نگاشت‌ها می‌باشد. این طیف، کاربردهای متنوعی دارد. جهت تعیین میزان اطمینان به صحت نتایج حاصل از طیف توان مقاطع، از این طیف استفاده می‌شود. آنچه که در حین یک آزمایش ارتعاش محیطی رخ می‌دهد تحریک سازه با فواصل متفاوت می‌باشد که باعث می‌شود مقادیر طیف ارتباط از مقدار واحد که نشان‌دهنده دو نگاشت کاملاً وابسته است، کاهش یابد. این طیف همواره مقداری بین صفر و یک را دارد. آنچه که در مورد این طیف مورد توجه قرار می‌گیرد این است که در فرکانس‌های غالب، سازه دچار تشدید می‌گردد و در منحنی تغییرات دامنه طیف در مقابل فرکانس مقداری به شکل پیک ظاهر می‌شود. مقدار طیف ارتباط بیشتر معرف کیفیت داده می‌باشد و می‌توان ادعا نمود پیک‌هایی از طیف ارتباط که بر پیک‌های تابع چگالی طیف توان منطبق گردد، اطمینان بیشتری به فرکانس تشدید بودن پیک‌ها ایجاد می‌کنند. مقدار این طیف از رابطه (۲۲) حاصل می‌شود [۲۱]:

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}} \quad (22)$$



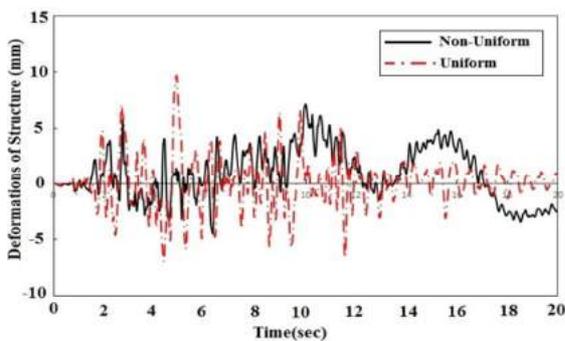
شکل ۱۰- طیف ارتباط بین زوج نقاط مختلف روی سطح زمین بدون وجود مترو دایکای

می‌باشد. افزایش فرکانس موجب افزایش نوسانات در طیف ارتباط بین زوج نقاط در هر دو حالت شده، ولی چنانکه اشاره شد این نوسانات با حضور سازه افزایش پیدا کرده است. وجود سازه در نقاط نزدیک به هم منجر به کاهش طیف ارتباط بین شتاب‌نگاشت‌ها شده است. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله نقاط از یکدیگر از میزان طیف ارتباط در هر دو وضعیت بارگذاری با وجود سازه کاسته شده و این نمودارها در مقایسه با قسمت قبل که مترو وجود نداشت، با هم انطباق بیشتری پیدا کرده‌اند.



شکل ۱۱- طیف ارتباط بین زوج نقاط مختلف روی سطح زمین با حضور ایستگاه متروی دایکای

است.



شکل ۱۲- تغییر مکان نسبی بین بالا و پایین ستون وسط

متروی دایکای

شکل ۱۱ طیف ارتباط بین نقاط اشاره شده در قسمت قبل را نشان می‌دهد. تفاوت تحلیل‌های انجام شده در این بخش و قسمت قبل در وجود سازه متروی دایکای در زمین می‌باشد. اثرات بارگذاری یکنواخت و غیریکنواخت روی تفرق امواج رسیده به سطح زمین، این بار با حضور سازه مترو مورد بررسی قرار می‌گیرد. چنانکه در این شکل قابل مشاهده می‌باشد، نمودارهای ارائه شده بین دو نقطه در این بخش، با وجود سازه دارای الگوی پیچیده‌تر و طیف ارتباط با نوسانات و پیک‌های بیشتری

تحلیل‌هایی که در بخش‌های قبلی این پژوهش ارائه شد، اثرات نحوه بارگذاری روی تفرق امواج لرزه‌ای در اثر سازه و تأثیرات آن روی بزرگنمایی در سطح زمین را نشان می‌دهد. در این بخش، تأثیرات این عامل بر روی تغییر مکان نسبی سازه بین بالا و پایین سازه در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بارگذاری به صورت غیریکنواخت موجب تغییر الگوی تغییر مکان جانبی سازه در مقایسه با وضعیت یکنواخت شده است. بیشترین مقدار تغییر مکان نسبی سازه در وضعیت بارگذاری یکنواخت به مقدار ۱۰ میلی‌متر اتفاق افتاده

## ۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از روش ارتعاش تصادفی شتاب‌های غیریکنواخت بر مبنای توابع ارتباطی تولید شد. سپس در ادامه، مدل دوبعدی از ساختگاه ایستگاه مترو در ژاپن با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC تهیه گردید. اثرات حضور سازه بر پدیده بزرگنمایی روی سطح زمین در دو وضعیت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به مواردی از نتایج حاصل شده در این پژوهش اشاره می‌شود:

۱- یکی از نتایج بارز مطالعه حاضر، تأثیر قطعی وجود سازه بر بزرگنمایی ایجاد شده در سطح زمین می‌باشد. حداکثر بزرگنمایی ۱/۷۵ در محل مجاور سازه مشاهده شد. بنابراین توصیه می‌شود در طراحی لرزه‌ای سازه‌های روی سطح زمین به این مسأله توجه شود.

۲- مقایسه حداکثر بزرگنمایی در نقاط مختلف و

همچنین حداکثر شتاب‌ها نشان‌دهنده تأثیر ملموس این پدیده در نزدیکی سازه می‌باشد. با افزایش فاصله از سازه این اثرات کاسته شده است.

۳- مقایسه بین دو وضعیت بارگذاری یکنواخت و

غیریکنواخت اثرات بارگذاری غیریکنواخت را به‌خصوص روی الگوی بزرگنمایی و مقدار حداکثر آن در نقاط نزدیک سازه نمایان ساخت. بنابراین توصیه می‌شود در طراحی لرزه‌ای برای هرچه واقعی‌تر شدن تحلیل‌ها در نظر گرفته شود.

۴- مقایسه طیف ارتباط بین زوج نقاط در فواصل

مختلف نشان می‌دهد که محدوده فرکانسی، فاصله از سازه و همچنین وضعیت بارگذاری در این طیف تأثیرگذار می‌باشد.

## مراجع

- [1] TaghaviGhalesari, A., Isari, M., Tarinejad, R., & Sohrabi-Bidar, A. (2019). "A procedure to predict the precise seismic response of arch dams in time domain using boundary element formulation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(4), 790-803.
- [2] Tarinejad, R., Isari, M., & Ghalesari, A. T. (2019). "A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(2), 267-284.
- [3] Tarinejad, R., Isari, M., & Sohrabi-Bidar, A. (2019). "A New Solution to Estimate the Time Delay on the Topographic Site Using Time Domain 3D Boundary Element Method", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, in Press.
- [4] Sohrabi-Bidar, A. (2008). *Seismic behavior assessment of surface topographies using time-domain 3D boundary elements method* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran).
- [5] Sohrabi-Bidar, A., Isari, M., & Tarinejad, R. (In press-2017). "Evaluation Topography Effect on the Pacoima Dam Site Using Boundary Element Method", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*.
- [6] Dowding, C. H., & Rozan, A. (1978). "Damage to rock tunnels from earthquake shaking", *ASCE J Geotech Eng Div*, 104(2), 175-191.
- [7] Jing-Ming, W., & Litehiser, J. J. (1985). "The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake", *Earthquake Spectra*, 1(4), 741-757.
- [8] Sharma, S., & Judd, W. R. (1991). "Underground opening damage from earthquakes", *Engineering geology*, 30(3-4), 263-276.
- [9] Baziar, M. H., Moghadam, M. R., Kim, D. S., & Choo, Y. W. (2014). "Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 10-22.
- [10] Baziar, M.H., Ghalandarzadeh, A., & Moghadam, M.R. (2015). "Tehran subway tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 3, 15-36.

- [11] Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M. K., & Panji, M. (2013). "Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity", *International Journal of Civil Engineering*, 11(1), 45-54.
- [12] Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2015). "Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 63-79.
- [13] Alielahi, H., & Ramezani, M.S. (2016). "Seismic Site amplification pattern caused by underground box-shaped structures", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 3, 55-71 (in persian).
- [14] Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). "Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications", *International Journal of Civil Engineering*, 14, 233-251.
- [15] Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., & Jafari, M.K. (2013). "Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM", *Geophysical Journal International*, 194, 1849-1865.
- [16] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., & Jafari, M.K. (2014). "Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM", *International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering*, 12, 193-206.
- [17] Jiang, L., Chen, J., & Li, J. (2010). "Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis", *Earthquake engineering and engineering vibration*, 9(4), 555-567.
- [18] Xu, Z., Du, X., Xu, C., Hao, H., & Bi, K. (2019). "Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure", *Soil Dyn Earthq Eng*, 116, 242-252.
- [19] Xu, Z., Du, X., Xu, C., Jiang, J., & Han, R. (2019). "Simplified equivalent static methods for seismic analysis of shallow buried rectangular underground structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 1-11.
- [20] Bi, K., & Hao, H. (2012). "Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions", *Probabilistic engineering mechanics*, 29, 92-104.
- [21] Tarinejad, R., & Damadipour, M. (2014). "Modal identification of structures by a novel approach based on FDD-wavelet method", *Journal of Sound and Vibration*, 333(3), 1024-1045.
- [22] Sun, Q., Dias, D., Guo, X., & Li, P. (2019). "Numerical study on the effect of a subway station on the surface ground motion", *Computers and Geotechnics*, 111, 243-254.



## تحلیل و بررسی پتانسیل زمین لغزش به کمک مدل سازی عددی (مطالعه موردی: محور قائن - افین در استان خراسان جنوبی)

زمین لغزش یکی از مخرب‌ترین حوادث طبیعی در زمین‌های شیب‌دار بوده که هر ساله منجر به خسارت‌های جانی و مالی فراوانی می‌شود. دامنه‌های شیب‌دار که در زمین‌های سست چه به صورت طبیعی یا مصنوعی ایجاد شده‌اند، مستعد پدیده زمین لغزش هستند. در زمستان ۱۳۹۰ در حین فعالیت‌های راهسازی برای توسعه و احداث جاده جدید قائن- افین در استان خراسان جنوبی و در مجاورت روستای روشک، رانش ناگهانی زمین منجر به تخریب پل سنگی جدیدالاحداثی در مسیر جاده گردید. در این مقاله، به بررسی این زمین لغزش و علت وقوع آن پرداخته شده است. برای این منظور، از تصاویر ماهواره‌ای، و تجربیات به دست آمده در بازدیدهای محلی استفاده شد و تحلیل پایداری دامنه و بررسی نوع زمین لغزش با بهره‌گیری از روش‌های تعادل حدی ساده شده بیشاپ و روش عددی المان محدود انجام گردید. با توجه به نتایج، عدم توجه به حرکات اولیه دامنه و ادامه کارهای ساختمانی در محدوده توده لغزشی از عوامل اصلی وقوع این زمین لغزش بوده و بارندگی نقش چندانی در بروز این پدیده نداشته است. ضریب ایمنی دامنه قبل از انجام خاکریزی جدید حدود ۱/۷ به دست آمد که پس از خاکریزی به ضخامت ۴ متر به ۰/۹۰ کاهش یافته است.

**واژگان کلیدی:** زمین لغزش، روش تعادل حدی، روش المان محدود، روستای روشک، خراسان جنوبی.

### حسین نوفرستی

استادیار، گروه مهندسی معدن،  
دانشکده مهندسی، دانشگاه  
بیرجند.

پست الکترونیک:

hnoferesty@birjand.ac.ir

### علی ویسکرمی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی  
معدن، دانشکده مهندسی،  
دانشگاه بیرجند.

پست الکترونیک:

veiskaramiali@yahoo.com

### محمد جواد رحیم‌دل\*

استادیار، گروه مهندسی معدن،  
دانشکده مهندسی، دانشگاه  
بیرجند.

پست الکترونیک:

rahimdel@birjand.ac.ir

### ۱- مقدمه

مشاهده است، یکی از پیش‌نشانگرهای زمین لغزش‌ها هستند. دامنه‌های پرشیب شیلی از مستعدترین مکان‌ها برای وقوع زمین لغزش می‌باشند. با این وجود، زمین لغزش‌ها در مناطق دیگر و در مقیاس‌های کوچکتر نیز رخ می‌دهند. زمین لغزش‌ها غالباً پس از زمین لرزه‌ها، بارندگی‌های شدید و حتی پس از برداشت بخشی از شیب‌ها به‌ویژه در حین ساخت جاده‌ها اتفاق می‌افتند [۳]. زمین لغزش یکی از مخاطرات زمین‌شناسی است که سالانه خسارت جانی و مالی فراوانی برجای می‌گذارد. به‌عنوان مثال، در سال ۱۹۸۲، بیش از ۸۱۰۰۰ زمین لغزش در مناطق مختلف کشور چین گزارش شده است [۴]. واقع شدن بخش‌های زیادی از ایران در مناطق

حرکت و جابه‌جایی رو به پایین بخشی از مواد دامنه در امتداد یک سطح گسیختگی مشخص را زمین لغزش می‌نامند. زمین لغزش‌ها انواع مختلفی داشته و در هر زمینی ممکن است ایجاد شود [۱]. ویژگی‌های توده متحرک و شکل سطح گسیختگی معمولاً به‌عنوان عوامل طبقه‌بندی لغزش‌ها به‌کار گرفته می‌شوند [۲]. شکاف بالای دامنه یا ترک کششی که به‌راحتی قابل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۴/۲۳، بازنگری ۱۳۹۸/۰۶/۰۲، پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۲.  
DOI: 10.22091/cer.2019.4620.1160 شناسه دیجیتال

معیارهای مؤثر بر رخداد زمین لغزش‌ها، درجه اهمیت هریک از شاخص‌ها با بهره‌گیری از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی تعیین شد. با توجه به نتایج این تحقیق، جنس خاک به عنوان مؤثرترین پارامتر در احتمال وقوع زمین لغزش‌ها معرفی گردید. همچنین، راهکارهایی نظیر کاهش تراکم ساختمانی و جمعیتی، ایجاد کمربند سبز، رعایت حریم اتوبان‌ها و استفاده از سازه‌های پایدار و مهندسی در محدوده‌های پرخطر به منظور کاهش احتمال وقوع مخاطرات زمین لغزش ارائه شد [۸]. بهاروند و همکاران، به پهنه‌بندی مخاطرات زیست‌محیطی زمین لغزش، زمین لرزه، سیل و فرسایش در محدود حوزه آبریز وارک واقع در استان لرستان با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی پرداختند. با توجه به نتایج این تحقیق، شاخص زمین لغزش دارای بالاترین درجه اهمیت در محدوده مورد مطالعه بود که این نتایج با مطالعات شمسی‌پور و شیخی (۱۳۸۹) [۹] در مطالعه نواحی غربی استان فارس مطابقت داشت. علاوه بر این، شیب و لیتولوژی منطقه به ترتیب دارای بالاترین اهمیت در بین عوامل مؤثر بر خطر زمین لغزش بودند [۱۰]. پژوهشگران دیگری، به بررسی مخاطرات زمین استان گلستان با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. با توجه به نتایج این تحقیق، تقریباً تمامی شهرستان‌های این استان در محدوده احتمال خطر زیاد تا خیلی زیاد زمین لغزش قرار داشتند که اقداماتی پیشگیرانه به منظور جلوگیری از بروز خطرات زمین لغزش پیشنهاد گردید [۱۱]. در تحقیقی دیگر نیز محققان، به پیش‌بینی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده چهارگوش قزوین- رشت پرداختند. برای این منظور، با استفاده از اطلاعات ۳۳۸ زمین لغزش رخ داده در محدوده مورد مطالعه، بهترین شبکه عصبی با میزان خطای ۴۱ درصد به منظور پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش ارائه شد [۱۲].

با توجه به موارد بالا، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به منظور بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش‌ها انجام شده

زلزله‌خیز و کوهستانی موجب گردیده که پدیده زمین لغزش سالانه خسارات قابل توجهی را به کشور وارد آورد. براساس برآوردهای اولیه، صرف‌نظر از اتلاف منابع طبیعی غیرقابل بازگشت در اثر وقوع زمین لغزش‌ها، سالیانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت‌های مالی بر کشور تحمیل می‌شود [۵]. یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در ایران، لغزش بزرگ سیمره (با وسعت تقریبی ۱۰۰۰۰۰ میلیون مترمربع) در محدوده جنوب‌غربی پلدختر و در دامنه‌های شمال شرقی تاق‌دیس کبیرکوه بوده که از نظر بزرگی، قابل مقایسه با زمین لغزه‌هایی نظیر پامیر و آلپ است [۶].

جاده‌ها از مهم‌ترین شریان‌های ارتباطی به منظور توسعه مناسبات تجاری و اقتصادی مطرح هستند. مخاطرات طبیعی نظیر زمین لغزش‌ها به‌عنوان یکی از عوامل وقوع حوادث جاده‌ای و کاهش ایمنی راه‌های ارتباطی مطرح بوده و فعالیت‌های انسانی ممکن است منجر به تشدید آن شود. از اینرو، انتخاب صحیح مسیر جاده‌ها، شناخت عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های دامنه‌ای و نیز شناسایی مکان‌های با قابلیت خطرپذیری بالا ضرورت دارد. زندی و همکاران، به بررسی و ارزیابی پتانسیل زمین لغزش در مسیر جاده پیشنهادی طرقله- درور در استان خراسان رضوی پرداختند. در این تحقیق، شاخص‌هایی نظیر ارتفاع، جهت و نوع شیب، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص توان آبراهه و شاخص حمل رسوب و بارش در محیط به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع حرکات دامنه‌ای در نظر گرفته شدند و پس از وزن‌دهی به روش آنتروپی، نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه گردید. با توجه به نتایج این پژوهش، شاخص‌های کاربری اراضی، نوع شیب و بارش به‌عنوان مؤثرترین عوامل در رخداد زمین لغزش در محدوده مورد بررسی بوده است [۷]. قنبری و همکاران، زمین لغزش‌های احتمالی در محدوده شهر تبریز را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، ابتدا به شناسایی لغزش‌های رخ داده پرداخته شد و پس از شناسایی

آبرفت‌های کوتاه‌تر یک رودخانه فصلی واقع شده که مسیر جاده قدیمی آن پس از عبور از کنار روستا و قطع بستر رودخانه، مطابق شکل ۱، از دیواره شرقی رودخانه بالا می‌رود. این دیواره با ارتفاع تقریبی ۳۰ متر عمدتاً از یک لایه شیل ائوسن قرمز رنگ با شیب کم و روند شمالی-جنوبی تشکیل شده است. بر روی این لایه، یک لایه مقاوم کنگلومرا به ضخامت تقریبی دو متر مشاهده می‌شود. در بالاترین بخش دیواره نیز لایه‌ای آبرفتی با ضخامت چند مترج وجود دارد. در بازدید اولیه از منطقه، مشاهده شد که به علت هوازگی و ریزش‌های مداوم لایه شیلی، به تدریج قسمت‌های زیرین لایه کنگلومرا خالی شده و در نهایت، بلوک‌های بزرگی از کنگلومرا در اثر نیروی وزن بر روی دامنه سقوط کرده است (شکل ۱).



شکل ۱- تصویر دیواره شرقی رودخانه فصلی روشک

همانگونه که اشاره شد، جاده خاکی و قدیمی قائن به افین پس از عبور از روستای روشک، که بر روی آبرفت‌های یک رودخانه فصلی واقع شده، از یک دامنه پرشیب شیلی و به صورت مورب بالا رفته تا شیب جاده به تدریج کاهش یابد. در طرح تعریض و توسعه جاده، به منظور عبور جریانات فصلی یک پل سنگی در پای دامنه احداث و همزمان شیب دامنه اصلاح شده است. بدین ترتیب، مسیر جدید جاده پس از عبور از روی پل، بدون نیاز به ایجاد مسیری مورب و طولانی، مستقیماً به بالای دامنه منتهی گردیده است. در جریان اصلاح شیب و خاکریزی دامنه قدیمی، به منظور احداث و استحکام کافی سازه پل، عملیات راهسازی به طور موقت متوقف شده

است. با این وجود، بیشتر تحقیقات انجام شده در مقیاس‌های کلان و محدوده‌های وسیع نظیر مناطق شهری و حوزه‌های آبریز و عمدتاً با استفاده از روش‌های تحلیلی و یا مدل‌های تصمیم‌گیری انجام شده است. از طرفی، تنها تحقیقات اندکی به منظور بررسی و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها در جاده‌ها و محورهای ارتباطی که به عنوان مهم‌ترین شریان‌های حمل‌ونقل و توسعه اقتصادی هستند، صورت گرفته است. بنابراین مقاله حاضر، به تحلیل و بررسی پتانسیل زمین‌لغزش در محور ارتباطی قائن-افین در استان خراسان جنوبی می‌پردازد. در زمستان ۱۳۹۰ در جریان راهسازی به منظور توسعه و احداث راه جدید قائن به افین در مجاورت روستای روشک، رانش ناگهانی زمین در یک دامنه شیلی به وقوع پیوست که در نهایت منجر به تخریب پل سنگی جدیدالاحداثی در مسیر جاده گردید. در این مقاله، با استفاده از وضعیت زمین‌شناسی منطقه، تصاویر ماهواره‌ای و تجربیات به دست آمده، به مدل‌سازی عددی زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزارهای SLIDE و Phase2 پرداخته شده است. با استفاده از نتایج این تحقیق، امکان پیش‌بینی لغزش‌های ناشی از ایجاد شیب‌های مصنوعی و جلوگیری از مخاطرات فاجعه‌بار وجود دارد.

ساختار این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، به بررسی موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی محدوده و زمین‌لغزش مورد مطالعه پرداخته شده است. بررسی و تحلیل زمین‌لغزش روشک با استفاده از روش‌های تحلیل حدی، تنش-کرنش و نیز مدل‌سازی لغزش در بخش چهارم ارائه شده است. در نهایت در بخش پنجم، نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه و توصیف زمین‌لغزش

### در محدوده مورد مطالعه

روستای روشک در ۲۳ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان قاین در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این روستا در مسیر جاده قائن به روستای افین و بر روی

است به دلیل عدم توجه به این نکته و به احتمال زیاد، به علت بارندگی های زمستانی، توده خاک سست تر شده و در اثر تحریکات ناشی از کار بولدوزر، لغزش وسیع و ویرانگری در حدود چهار ماه بعد رخ داده است. نمایی از این زمین لغزش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- این لغزش در مجموعه ای از خاکریزی های جدید ایجاد شده، خاک های قدیمی ریخته شده برای احداث راه قبلی و نیز رسوبات شیلی هوازده اتفاق افتاده است.

۴- مطابق شکل ۴، انتهای سطح لغزش دقیقاً در وسط پل قرار داشته که همین امر موجب دو تکه شدن پل شده است. نمایی از پل تخریب شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

است. در بهار ۱۳۹۱ با اتمام ساخت پل، بولدوزر مجدداً به بالای دامنه منتقل شده و عملیات خاکریزی ادامه می یابد. پس از گذشت چند روز و در حین کار بولدوزر، رانش زمین تنها در چند متری بولدوزر روی داده و توده عظیمی از خاک در مسیر خود باعث تخریب پل شده است.

با توجه به بازدیدهای محلی، بررسی های میدانی و نیز تصاویر ماهواره ای، نکات زیر در رابطه با این زمین لغزش قابل توجه هستند:

- ۱- زمین لغزش رخ داده از نوع لغزش دایره ای (قاشقی) با ابعاد تقریبی  $80 \times 50$  متر بوده که نمایی از آن در شکل های ۲ و ۳ (الف) نشان داده شده است.
- ۲- به علت اصلاح غیراصولی شیب دامنه، حرکت های ابتدایی و هشداردهنده ای به وقوع پیوسته که در تصویر ماهواره ای مورخ ۲۰۱۱/۱۱/۹ در نرم افزار Google Earth مطابق شکل ۲ قابل تشخیص



شکل ۲- حرکت دامنه رودخانه روشک در تصویر ماهواره ای مورخ ۲۰۱۱/۱۱/۹



(ب)



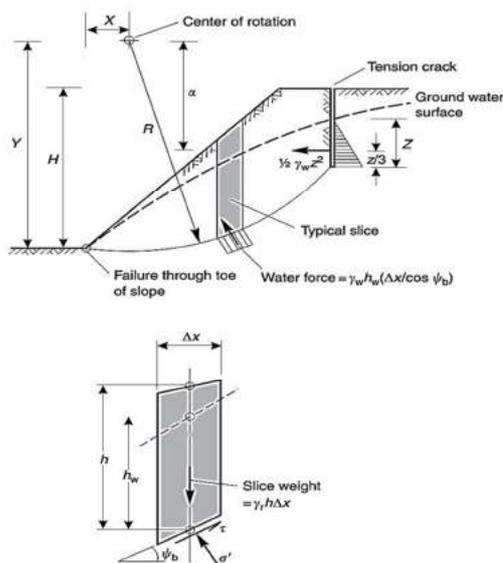
(الف)

شکل ۳- تصویر تاج زمین لغزش روشک (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک

کارایی بیشتر، نسبت به روش‌های تنش- کرنش ساده‌تر و قابل فهم‌تر هستند [۱۳ و ۱۴]. این روش‌ها در ادامه تشریح شده‌اند.

### ۳-۱- روش تعادل حدی

معمولا در تمام روش‌های تعادل حدی، توده خاک بالای سطح لغزش، مطابق شکل ۶، به قطعاتی قائم تقسیم می‌شوند. نیروهای وارده بر هر قطعه، جداگانه در شکل ۶ نشان داده شده است. با وجود روش‌های متنوع تعادل حدی، این دسته از روش‌ها در زمینه فرضیات مربوط به معادلات تعادل نیروها و لنگرها حول نقطه مرکزی چرخش (O) اختلاف نظر دارند [۱۵].



شکل ۶ - تصویر یک قطعه و نیروهای وارده بر آن [۱۶]

در این مقاله، از روش ساده شده بیشاپ<sup>۳</sup> استفاده شده است. در این روش، از نیروی برشی بین قطعات صرف‌نظر شده و با تغییر سایر نیروهای وارد بر هر قطعه، معادلات تعادل لنگرها و نیروهای قائم تشکیل می‌شوند. همچنین، ضریب ایمنی با روش سعی و خطا و با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌گردد [۱۶]:

علاوه بر اصلاح غیراصولی شیب، مسیری که بر روی خاکریز جاده قدیمی واقع شده، عدم توجه به شواهد اولیه حرکات و جابه‌جایی‌های زمین نیز از جمله عوامل مؤثر در وقوع این پدیده بوده است. به‌گونه‌ای که اگر عملیات احداث پل پس از آماده‌سازی مسیر و اصلاح اصولی شیب خاکریز انجام می‌گرفت، احتمال بروز چنین خسارات سنگینی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یافت.



شکل ۴- انتهای زمین لغزش روشک در فاصله بین دو پایه پل



شکل ۵- تخریب پل سنگی در اثر لغزش زمین روشک

### ۳- روش تحقیق، تحلیل و مدل‌سازی

#### زمین‌لغزش‌ها

تاکنون روش‌های تجربی، گرافیکی و ریاضی مختلفی به منظور تحلیل زمین‌لغزش‌ها ارائه گردیده است. در این میان، روش‌های ریاضی، روش‌های تقریباً جامع‌تری هستند که به دو گروه روش‌های تعادل حدی<sup>۱</sup> و تنش-کرنش<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. روش‌های تعادل حدی، علاوه بر

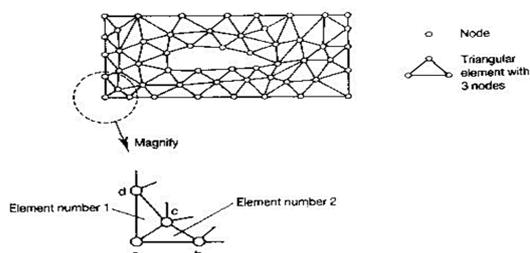
<sup>3</sup>- Bishop's simplified method

<sup>1</sup>- Limit equilibrium method

<sup>2</sup>- Stress-Strain method

یا خاکریزهای خاکی صورت پذیرد که در این صورت استفاده از روش های عددی نه تنها مطلوب بلکه ضروری هستند [۱۷].

در این تحقیق، از روش عددی المان محدود برای مدل سازی استفاده شده است. روش المان محدود نسبت به روش تعادل حدی دارای مزایایی نظیر مدل کردن شیب ها با درجه واقع گرایی بسیار بالا (هندسه پیچیده، بارگذاری های متناوب، حضور تقویت کننده ها، عملکرد آب، قوانینی برای رفتارهای پیچیده خاک) و نیز تصویرسازی دقیق از تغییر شکل های ایجاد شده در شیب است [۱۴]. در روش المان محدود، زمین به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده و در صورت لزوم، ناپیوستگی ها به صورت مجزا و به تعداد محدود با المان های خاصی به نام المان فصل مشترک، شبیه سازی می شوند. محدوده مدل، یعنی زمین دربرگیرنده، به تعداد محدودی المان تقسیم شده که مطابق شکل ۷، از طریق نقاط گرهی در گوشه های المان ها به هم متصل هستند [۱۸].



شکل ۷- نمایش تصویری روش المان محدود [۱۹]

در روش المان محدود، ارتباط هندسی و فیزیکی بین تمام المان های یک مدل به صورت یک مسئله ریاضی با معادلات ماتریسی صورت می پذیرد. شکل کلی معادلات ماتریسی روش المان محدود براساس رابطه (۶) است [۱۹]:

$$[K] \times [D] = [F] \quad (6)$$

که در این رابطه،  $K$  ماتریس سختی،  $D$  ماتریس جابه جایی (مجهول مسئله) و  $F$  ماتریس بارهای وارده است. این ماتریس برای تک تک المان ها تشکیل و در

$$FS = \frac{\sum \frac{X}{1+Y/FS}}{\sum Z+Q} \quad (1)$$

پارامترهای رابطه فوق به صورت روابط (۲) تا (۵) بیان می شوند:

$$X = [C + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \tan \phi] (\Delta X / \cos \psi_b) \quad (2)$$

$$Y = \tan \psi_b \tan \phi \quad (3)$$

$$Z = \gamma_r h \Delta X \sin \psi_b \quad (4)$$

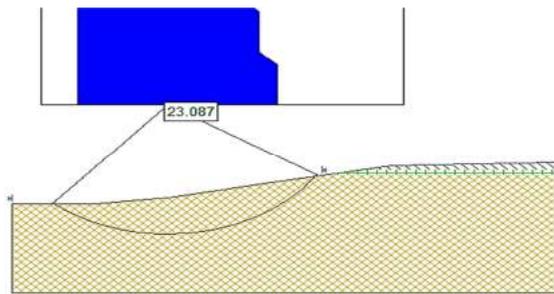
$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 (\alpha/R) \quad (5)$$

در این روابط،  $Q$  فشار آب منفذی در هر قطعه برحسب (MPa)،  $c$  و  $\phi$  پارامترهای مقاومت برشی خاک،  $\gamma_r$  وزن مخصوص توده سنگ برحسب  $(\frac{MN}{m^3})$ ،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب  $(\frac{MN}{m^3})$ ،  $h_w$  ارتفاع آب در قطعه مورد بررسی برحسب (متر)،  $h$  ارتفاع قطعه مورد مطالعه برحسب (متر)،  $R$  شعاع دایره لغزش بحرانی برحسب (متر)،  $\alpha$  فاصله قائم بین مرکز دایره لغزش بحرانی و محل اعمال نیروی آب در ترک کششی برحسب (متر)،  $Z$  ارتفاع آب در ترک کششی برحسب (متر)،  $\psi_b$  زاویه شیب قاعده قطعه و  $\Delta X$  پهنای افقی هر قطعه برحسب (متر) هستند.

از آنجا که پیاده کردن روش های تعادل حدی به صورت دستی برای دیواره های شیب دار با هندسه پیچیده بسیار وقت گیر است، معمولاً از نرم افزارهای تجاری برای این منظور استفاده می شود. در مطالعه حاضر، از نرم افزار SLIDE استفاده شده است.

### ۳-۲- روش تنش- کرنش

در ارزیابی سازه های ژئوتکنیکی، اغلب استفاده از روش های تعادل حدی برای تحلیل مسئله کافی بوده و روش های عددی پیشرفته تنها جهت بهبود و تکمیل این ارزیابی ها استفاده می شوند. اما در برخی موارد لازم است که ارزیابی دقیقی از تنش ها و کرنش های موجود در شیب



شکل ۸- تحلیل پایداری مدل اولیه دامنه همراه با فاکتور ایمنی به روش بیشاپ ساده شده

برای تکمیل این مدل، به شیب، امتداد لایه‌بندی و خواص ژئوتکنیکی لایه‌ها نیاز بود. بنابراین شیب و امتداد لایه‌ها توسط کمپاس و مشاهدات صحرائی تعیین گردیدند. خواص ژئوتکنیکی نیز براساس برآوردهای صحرائی و همچنین با بهره‌گیری از بانک اطلاعات ژئوتکنیکی موجود در نرم‌افزار ROCKDATA انتخاب شدند. شیب، امتداد لایه‌ها و خواص ژئوتکنیکی انتخاب شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی اولیه انواع لایه‌های موجود در محل وقوع

لایه‌بندی	c ( $\text{kN/m}^2$ )	$\phi$ (درجه)	وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^3$ )	رنگ‌بندی لایه در مدل تعادل حدی
آبرفت	۱۵	۳۳	۱۸	آبی
کنگومرا	۲۵۰۰	۴۴	۲۵	سبز
شیل	۱۰۰۰	۲۵	۲۰	زرد هاشوردار

راهسازی قدیم و جدید، سه نوع شیل یا خاک شیلی در دامنه اصلاح شده وجود داشته که شامل خاک شیلی بسیار سست جابه‌جا شده توسط بولدوزر، خاک شیلی سست و هوازده ناشی از فعالیت راهسازی قدیمی و سنگ شیل برجا و دست‌نخورده در زیر دو لایه هستند. از اینرو، خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های جدید اضافه شده به مدل مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شدند که ضعیف‌تر از لایه شیل دست‌نخورده هستند.

۳- با توجه به وقوع لغزش در انتهای فصل زمستان و اوایل بهار، حضور آب‌های زیرزمینی در دامنه محتمل بوده است. به‌همین دلیل، ضریب فشار آب زیرزمینی ( $RU$ ) در لایه‌های شیل به‌میزان

نهایت ماتریس کلی مدل تشکیل شده و حل کل معادلات به‌صورت همزمان انجام می‌شود.

#### ۴- بحث و تحلیل زمین‌لغزش روشک

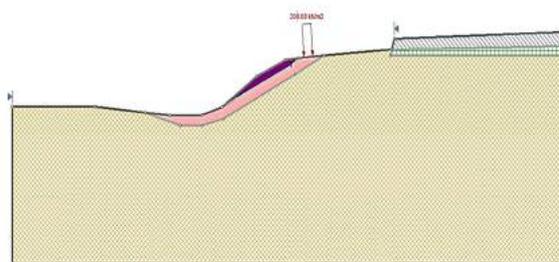
در این بخش، به مدل‌سازی و تحلیل زمین‌لغزش روشک پرداخته شده است.

برای تعیین وضعیت هندسی دامنه لغزش از تصاویر ماهواره‌ای نرم‌افزار Google Earth استفاده گردید. همچنین با مراجعه به محل و با استفاده از GPS برداشت‌های کنترلی صورت پذیرفت. وضعیت دامنه در آستانه و پس از لغزش نیز به‌کمک GPS، نقشه‌برداری و تصاویر ماهواره‌ای مشخص شدند. در ابتدا با استفاده از این اطلاعات، مدل اولیه دوبعدی دامنه که مربوط به قبل از انجام هرگونه فعالیت راهسازی است در نرم‌افزار SLIDE مطابق شکل ۸ ایجاد گردید.

با توجه به شکل ۸، ضریب ایمنی برای پایداری دامنه طبیعی و دست‌نخورده بسیار بالا بوده و لغزش کلی در دامنه طبیعی اتفاق نخواهد افتاد. در ادامه کار به‌کمک برداشت‌های صورت گرفته از محل، مدل هندسی دامنه ریزش نموده در آستانه لغزش ایجاد شد. در این مدل، وضعیت کلی هندسی و لایه‌بندی مشابه مدل قبلی است. با این وجود به‌هنگام ساخت این مدل، موارد زیر در نظر گرفته شدند:

۱- شیب دامنه به‌دلیل فعالیت‌های راهسازی قدیم و جدید به‌شدت افزایش یافته است.

۲- لایه شیلی تشکیل‌دهنده دامنه را نمی‌توان مشابه یک دامنه طبیعی یکدست و محکم در نظر گرفت. به‌عبارت دیگر، به‌علت فعالیت‌های



شکل ۹- مدل هندسی زمین لغزش روشک در نرم افزار SLIDE

با توجه به موارد بالا، تحلیل پایداری دامنه به روش تعادل حدی بیشاپ ساده شده انجام گردید که نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰، از آنجا که ضریب ایمنی به اندازه ۰/۵۱ به دست آمده است، لغزش دامنه در مدل ایجاد شده، حتمی است.

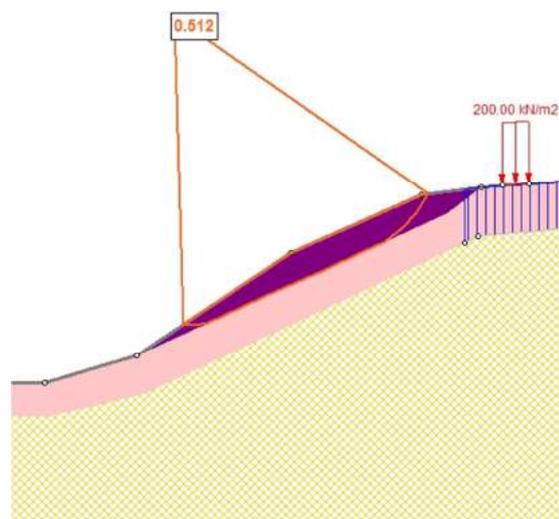
حداکثر ۰/۵ اعمال گردید. شایان ذکر است که لایه کنگلومرا، به عنوان یک لایه نفوذناپذیر منظور گردیده است.

۴- همانگونه که در قسمت توصیف لغزش بیان گردید، درست در لحظه لغزش، بولدوزر پیمانکار مشغول به کار در بالای دامنه بوده است. بنابراین، برای اینکه مدل ساخته شده به واقعیت نزدیک تر باشد، نیروی خارجی ناشی از وزن بولدوزر نیز در مدل اعمال گردید. از اینرو، با در نظر گرفتن وزن بولدوزر، نوع و محل قرارگیری آن در لحظه لغزش، مطابق شکل ۹، بار گسترده ۲۰۰ کیلو پاسکال در مدل اعمال گردید.

جدول ۲- مشخصات ژئوتکنیکی تفصیلی انواع لایه های موجود در محل وقوع

RU	رنگ لایه ها در مدل عددی	$E$ (MPa)	وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^3$ )	$\phi$ (درجه)	$c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	نوع لایه بندی
صفر	آبی	۱۱۱	۱۸	۳۳	۱۵	آبرفت
صفر	سبز	۴۱۲۵۰	۲۵	۴۴	۲۵۰۰۰	کنگلومرا
۰/۵	زرد	۷۳۰	۲۴/۵	۲۶	۱۱۴۰	شیل سخت
۰/۵	صورتی	۱۷/۱۵	۲۴/۵	۲۰	۳۰	شیل نیمه سخت
۰/۵	بنفش	۴/۱۷	۲۰	۱۵	۸	شیل سست

در نرم افزار SLIDE به نرم افزار Phase2 انتقال داده شد. از آنجا که به منظور تعیین ضریب ایمنی در روش های المان محدود، از روش کاهش مقاومت برشی ( $SSR^4$ ) استفاده می شود، نکات مدل سازی لازم مرتبط با این روش رعایت گردید. طبق توصیه های مرجع [۲۰]، در مدل عددی از ۳۰۰۰ المان یکنواخت ۶ گرهی مثلثی استفاده شد. وضعیت تنش به صورت ثقلی با نسبت  $k=1$ ، مدل رفتاری مصالح الاستوپلاستیک و معیار مقاومتی مصالح موهر کولمب فرض گردید. ضریب کاهش مقاومت بحرانی ( $CSRF^5$ ) تقریباً معادل ضریب ایمنی دیواره در حالت تعادل حدی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود دامنه در شکل ۱۱ آورده شده



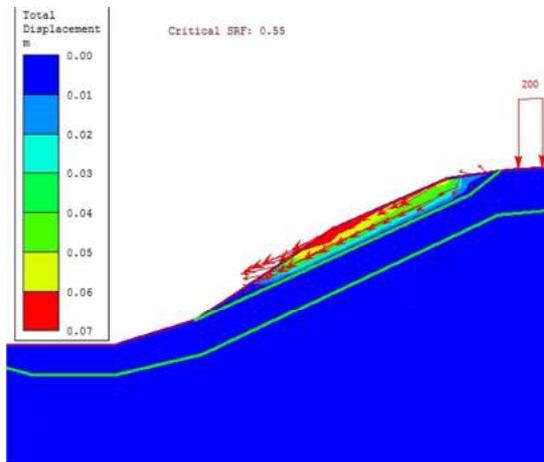
شکل ۱۰- ضریب ایمنی زمین لغزش روشک به کمک روش بیشاپ ساده شده

برای بررسی بیشتر و تکمیل نتایج حاصل از روش تعادل حدی، دامنه ریزش کرده به روش المان محدود نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مدل ایجاد شده

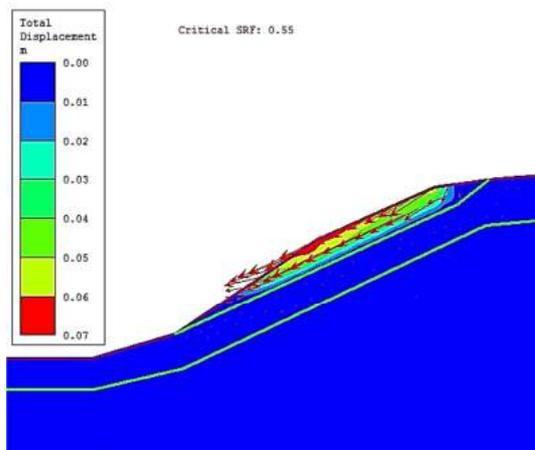
4- Shear Strength Reduction

5- Critical Strength Reduction Factor

Ruهای ممکن ناپایدار است. بنابراین می‌توان گفت که ریزش دامنه در اثر بارندگی اتفاق نیفتاده است چراکه حتی در دامنه کاملاً خشک ( $Ru=0$ ) نیز ضریب ایمنی دامنه کمتر از ۱ به‌دست آمده است.



شکل ۱۱- ضریب ایمنی معادل روشک به‌روش المان محدود



شکل ۱۲- ضریب ایمنی معادل روشک به‌روش المان محدود

بدون تأثیر فشار بولدوزر

جدول ۳- تأثیر تغییر فشار آب منفذی بر پایداری دامنه

ضریب ایمنی دامنه	نسبت فشار آب منفذی لایه شیل ( $Ru$ )	ردیف
۰/۵۵	۰/۵	۱
۰/۶۳	۰/۴	۲
۰/۷۰	۰/۳	۳
۰/۷۷	۰/۲	۴
۰/۸۴	۰/۱	۵
۰/۹۰	صفر	۶

به‌صورت مرحله‌ای انجام (شکل ۱۳) و در هر مرحله ضریب ایمنی دیواره محاسبه گردید. نتایج حاصل در

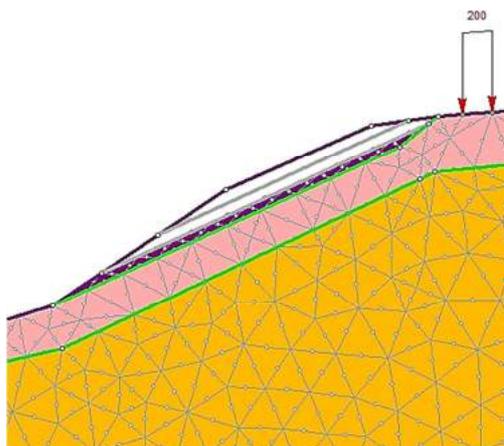
است. با توجه به ضریب SRF بحرانی که معادل ۰/۵۵ و نزدیک به ضریب ایمنی در روش تعادل حدی در نظر گرفته شده، ملاحظه می‌شود که نتایج به‌دست آمده از روش المان محدود با نتایج حاصل از روش تعادل حدی، همخوانی خوبی دارند.

#### ۴-۱- بررسی تأثیر عوامل مختلف در وقوع ریزش

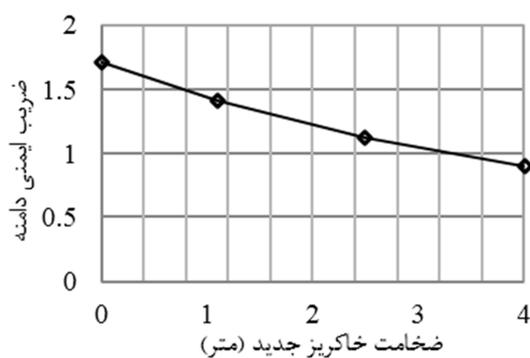
در بخش ۲ این مقاله که به توصیف زمین‌لغزش پرداخته شد سه عامل اصلاح غیراصولی شیب، بارندگی و حضور بولدوزر بر روی دامنه به‌عنوان عوامل محرک لغزش مورد بحث قرار گرفتند. در این قسمت برای بررسی میزان تأثیر هر یک از این عوامل از مدل عددی ایجاد شده کمک گرفته می‌شود. در ابتدا با حذف نیروی خارجی معادل وزن بولدوزر در مدل مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که هیچگونه تغییری در ضریب ایمنی دامنه اتفاق نمی‌افتد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که محدوده اعمال فشار وزنی بولدوزر خارج از محدوده توده لغزشی قرار می‌گیرد. به‌همین دلیل می‌توان گفت که صرف حضور بولدوزر در بالای دامنه، نقشی در وقوع ریزش نداشته است.

با تغییر فشار آب منفذی لایه شیل در مدل عددی، نقش این عامل نیز مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ خلاصه نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳، مشاهده می‌شود که دامنه مورد بررسی در تمامی

برای بررسی تأثیر بارگذاری ناشی از خاکریزی جدید بر روی دامنه، ایجاد لایه خاکریز جدید در مدل



شکل ۱۳- ایجاد مرحله‌ای خاکریز در مدل عددی (در این شکل مرحله اول خاکریز ایجاد شده است)



شکل ۱۴- تأثیر پیشرفت عملیات خاکریزی بر پایداری دامنه روشک

جدول ۴- تأثیر خاکریزی جدید در بالای دامنه بر پایداری آن (خاکریز بصورت مرحله‌ای ایجاد شده است)

ردیف	ضخامت خاکریز جدید (متر)	ضریب ایمنی کل دامنه
۱	صفر	۱/۷۱
۲	۱/۱۰	۱/۴۱
۳	۲/۵۰	۱/۱۳
۴	۴/۰۰	۰/۹۰

احداث تأسیسات مهندسی در پای دامنه بایستی پس از اصلاح شیب یا پایدارسازی دامنه صورت گیرد.

۳- عدم توجه به حرکات اولیه دامنه، اشتباهی بسیار بزرگ است که ممکن است نتایج فاجعه‌باری را به دنبال داشته باشد. با این وجود، چنین حرکتی بر روی زمین یا به کمک عکس‌های ماهواره‌ای در مقیاس‌های بزرگ‌تر به راحتی قابل شناسایی

جدول ۴ مشاهده می‌شود. تأثیر پیشرفت کار خاکریزی بر کاهش ضریب ایمنی دامنه (شکل ۱۴) به خوبی قابل مشاهده است و بنابراین می‌توان براساس نتایج مطالعه عددی صورت گرفته، افزایش شیب دامنه در اثر خاکریزی جدید را عامل اصلی وقوع زمین لغزش روشک معرفی نمود.

## ۵- نتیجه گیری

پدیده زمین لغزش یکی از انواع مخاطرات زمین‌شناسی بوده که ممکن است منجر به کاهش ایمنی راه‌های ارتباطی گردد. زمین لغزش‌ها همانند دیگر مخاطرات زمین، در بسترهای زمین‌شناسی خاص و همراه با پیش نشانگرهایی رخ می‌دهند که توجه به آنها، این پدیده را مدیریت پذیر نموده و خطر آن را به شدت کاهش می‌دهد. در این مقاله، به ارزیابی و تحلیل زمین لغزش در مسیر جدید قائن-افین و در مجاورت روستای ورشک در استان خراسان جنوبی پرداخته شد. برای این منظور از روش تحلیل بیشاب و روش عددی المان محدود استفاده گردید.

نتایج این تحقیق را می‌توان به طور خلاصه در موارد زیر بیان نمود:

۱- اگرچه وقوع زمین لغزش در هر نوع زمینی محتمل است، اما در مواجهه با دامنه‌های رسی (نظیر شیل، مارن، آرژیلیت و مادستون) یا خاکریزهای قدیمی مشابه مطالعه حاضر، باید دقت زیادی به خرج داد.

۲- در محلهایی که احتمال ریزش دامنه وجود دارد،

حدود ۱/۷ به‌دست آمد که پس از خاکریزی به ضخامت ۴ متر به ۰/۹۰ کاهش یافته است. با توجه نتایج این تحقیق، فعالیت غیراصولی در جریان عملیات راهسازی بر دامنه‌های سست شیلی، از عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه بوده است. نتایج حاصل از این مقاله، نمونه عبرت‌آموزی از عدم توجه به هشدارهای طبیعی زمین نسبت به انجام تغییراتی فراتر از تحمل آن است. از این‌رو، پیشنهادهای نظیر ایجاد بانک‌های اطلاعاتی زمین‌لغزش در محدوده‌های مورد مطالعه، پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش پیش از آغاز عملیات راهسازی و پرهیز از هرگونه تحرکات مصنوعی و نیز ارائه طرح‌هایی جهت مقابله با لغزش‌های احتمالی به‌عنوان راهکارهایی عملی به‌منظور کاهش احتمال بروز چنین مخاطراتی ارائه می‌گردد.

هستند.

- ۴- چنانچه دامنه‌ای دچار حرکات لغزشی بسیار جزئی گردد، باید از هرگونه کار تحریک‌آمیز نظیر حرکت ماشین‌آلات راهسازی بر روی آن اجتناب نمود و در صورت لزوم، پایدارسازی را هرچه سریع‌تر و قبل از فصل بارندگی انجام داد.
- ۵- در بررسی اولیه که پس از بازدید صحرایی صورت گرفت سه عامل اصلاح شیب غیراصولی، بارندگی و وجود بولدوزر در بالای دامنه عوامل مؤثر در لغزش شناخته شدند.
- ۶- در بررسی دقیق عددی مشخص شد که عامل اصلی وقوع روشک اصلاح شیب غیراصولی دامنه بوده و بارندگی و بارگذاری ناشی از ماشین‌آلات نقش چندانی در لغزش زمین نداشته است.
- ۷- ضریب ایمنی دامنه قبل از انجام خاکریزی جدید

## مراجع

- [1] Hencher, S. (2013). "Practical engineering geology", CRC Press.
- [2] Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). "The Varnes classification of landslide types, an update". *Landslides*, 11(2), 167-194.
- [3] Cruden, D. (2017). *Landslide risk assessment*. Routledge.
- [4] Yin, Y., Huang, B., Wang, W., Wei, Y., Ma, X., Ma, F., & Zhao, C. (2016). "Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 577-595.
- [5] Parsaei, L., Salarian, F., & Sheraeni, M. (2009). "Landslides of Golestan Province". *5<sup>th</sup> National conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran*, Gorgan, Iran.
- [6] Baharvand, S., Pourkermani, M., Arian, M., Ajalloian, R., & Nouryazdan, A.R. (2009). "Seymareh Landslide and its role in environmental and geomorphologic changes of the Pole-Dokhtar area", *Quarterly Iranian Journal of Geology*, 4(4), 13-24.
- [7] Zandi, R., Amirahmadi, A., & Mohamadnia, M. (2018). "Use of entropy model to assess the risk of landslide in the proposed road route of Torqabeh-Dorood (Mashhad-Neyshabur)". *Geography and Human Relationships*, 1(2), 37-58
- [8] Ghanbari, A., Karami, F., & Saleki, M.A. (2017). "An evaluation of feasibility of potential landslide in City of Tabriz". *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(1), 1-16.
- [9] Shamsipour, A., & Shekhi, M. (2010). "Zoning of Sensitive Area and Environment Vulnerable in West of Fars Province using Fuzzy and AHP Claassification", *Physical Geography Research Quarterly*, 42(73), 53-67.
- [10] Baharvand, S., Soori, S., & Rahnama Rad, J. (2017). "Environmental hazards zonation landslide, earthquake, flood and erosion using AHP Fuzzy method (Case study: Vark Basin)". *RS & GIS for Natural Resources*, 8(3), 89-103.
- [11] Farajzadeh, M., Servati, M.R., & Taheri, V. (2011). "Analysis of the Geomorphological hazards in Golestan Province", *Journal of Physical Geography*, 4(11), 45-62.
- [12] Pasha, A.H., Sorbi, A., Behzadi, S. (2018). "Landslide risk assessment in Qazvin-Rasht quadrangle zone (North of Iran)". *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCE*, 27(106), 89-98.
- [13] Cheng, Y. M., & Lau, C. K. (2014). *Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight*. CRC Press.
- [14] Matthews, C., Farook, Z., & Helm, P. (2014). "Slope stability analysis-limit equilibrium or the finite element method". *Ground Engineering*, 48(5), 22-28.

- [15] Rickard, O. C., & Sitar, N. (2012). bSLOPE: "A Limit Equilibrium Slope Stability Analysis Code for iOS". *Geotechnical Engineering Report no. UCB/GT/12-01. Geotechnical Engineering Department of Civil and Environmental Engineering, University of California-Berkeley, CA, 94720.*
- [16] Duncan C. W., (2017). *Rock Slope Engineering: Civil Applications*. 5<sup>th</sup> ed. CRC Press.
- [17] Chowdhury, R., Flentje, P., & Bhattacharya, G. (2010). *Geotechnical slope analysis*. CRC Press.
- [18] Scheldt, T. (2003). "Comparison of continuous and discontinuous modelling for computational rock mechanics", Doctoral Thesis, *Norwegian University of Science and Technology*.
- [19] Hutton, D. V., (2017). *Fundamentals of finite element analysis*. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-hill.
- [20] Rocscience Inc. (2019). "RS<sup>2</sup> online help, Shear strength reduction (SSR) analysis", [https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=tutorials%2F03\\_Shear\\_Strength\\_Reduction\\_Analysis.htm](https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=tutorials%2F03_Shear_Strength_Reduction_Analysis.htm).

## تحلیل عددی حفر تونل‌های بزرگ مقطع و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: تونل راه آهن کوهین محور قزوین - رشت)

امروزه یکی از چالش‌های مدیریت ایمنی فضاهای زیرزمینی در حال ساخت، جریان یافتن آب به داخل این تونل است. این موضوع یکی از مهم‌ترین مسائلی محسوب می‌شود که آثار مخربی بر روند عملیات حفر تونل و فعالیت‌های جنبی بعد از آن (نصب سامانه نگهداری) دارد؛ بنابراین محاسبه میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل به‌منظور پیش‌بینی تمهیدات ایمنی، قبل از شروع عملیات تونل‌زنی اهمیت بسزایی دارد. علاوه بر اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، رخ دادن پدیده نشست در سطح بالای تونل و سطح ایستایی و تغییر روند جریان آب زیرزمینی در منطقه، از جمله مواردی است که در صورت عدم توجه به آنها، حوادث و سوانح غیرقابل جبرانی اتفاق می‌افتد. بنابراین باید تمهیدات لازم برای کاهش وقوع این حوادث در نظر گرفته شود. در این پژوهش، اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ایجاد شده در اثر حفر تونل راه‌آهن کوهین مورد بررسی قرار گرفته است که شامل نشست زمین در سطح ایستایی و تغییر در روند جریان آب زیرزمینی در منطقه می‌شود. راهکارهایی برای کاهش این اثرات ارائه شده است که می‌توان به بازیابی سطح آب زیرزمینی با استفاده از پوشش بتنی آب‌بند بدون انجام عملیات زهکشی و به‌کارگیری همزمان روش فورپولینگ اشاره کرد. به‌کارگیری این موارد، مستلزم استفاده از پوشش بتنی با خصوصیات مقاومتی بالا جهت تحمل فشار هیدرواستاتیکی آب جمع شده در پشت پوشش است.

واژگان کلیدی: مدیریت ایمنی، نشست زمین، سطح آب زیرزمینی،  $FLAC^{2D}$ .

نوع از فضاهای زیرزمینی، نشست سطح زمین از جمله مسائل بسیار مهمی است که باید توجه ویژه‌ای را بدان معطوف کرد [۱]. حفر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ محل شده و باعث ایجاد تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در وضعیت تنش‌های برجای اطراف این سازه‌ها می‌شود. از سوی دیگر، حفر تونل باعث تغییر شرایط و وضعیت تنش‌های مؤثر و برجا در زمین می‌شود که موجب تغییر شکل‌هایی در آن خواهد شد؛ به این ترتیب که تاج تونل در اثر فرآیند حفر نشست

رضا میکائیل \*

دانشیار، دانشکده مهندسی معدن  
و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه.  
پست الکترونیک:  
Reza.mikaeil@gmail.com

محمد عطایی

استاد، دانشکده مهندسی معدن،  
ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی  
شاهرود.  
پست الکترونیک:  
Ataei@shahroodut.ac.ir

فرهنگ سرشکی

استاد، دانشکده مهندسی معدن،  
ژئوفیزیک و نفت، دانشگاه صنعتی  
شاهرود.  
پست الکترونیک:  
F.sereshki@gmail.com

امیر جعفرپور

دانشجوی دکتری، دانشکده  
مهندسی معدن و متالورژی،  
دانشگاه یزد.  
پست الکترونیک:  
Amir.jafarpour@stu.yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، احداث تونل برای اهداف مختلف در مناطق شهری، جاده‌ای و معدنی افزایش چشمگیری داشته است. با توجه به توسعه روزافزون به‌کارگیری این

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۱۵، بازنگری ۱۳۹۸/۰۵/۳۰، پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۸.  
(DOI): 10.22091/cer.2019.4328.1150 شناسه دیجیتال

شده است که در ادامه، به برخی از آنها به اختصار اشاره می‌شود.

کسانو<sup>۱</sup> و همکاران، پارامترهای تنظیم‌کننده ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌های حفاری شده در سنگ‌های سخت را با استفاده از مطالعات آماری و عددی ارزیابی کردند و تونل بولمن<sup>۲</sup> (واقع در جنوب سوئد) را در قالب مطالعه موردی بررسی کردند [۵]. لی و نام<sup>۳</sup> نیز در پژوهش خود به مطالعه نیروهای ناشی از نشت آب‌های زیرزمینی در تونل‌های کم‌عمق پرداختند و با استفاده از روش‌های عددی، نقش سامانه نگهداری فعال تونل را تحلیل کردند [۶]. محققان دیگری در قالب یک مطالعه موردی، به بررسی عملیات حفاری تونل‌های سنگی در حین مواجهه با آب‌های زیرزمینی پرداختند. این پژوهشگران، مطالعه خود را بر روی تونل‌های تایوان انجام دادند [۷]. همچنین در پژوهشی دیگر، تحلیل عددی تأثیر جریان آب‌های زیرزمینی بر رفتار بلندمدت تونل‌ها بررسی شده و نتایج پژوهش با شرایط واقعی حفر تونل اعتبارسنجی گردید [۸]. مالینرو<sup>۴</sup> و همکاران نیز در مطالعه‌ای به مدل‌سازی عددی پاسخ هیدروژئولوژیکی گذرا که توسط حفاری تونل در سنگ بستر خردشده ایجاد می‌شود، پرداختند [۹]. پژوهشگران در تحقیقی، رویکردهای مدل‌سازی عددی جایگزین برای جریان آب زیرزمینی در سنگ‌های شکننده و درزه‌دار را مقایسه کردند [۱۰]. در مطالعه مارشال و پرچت<sup>۵</sup>، راه‌حل تحلیلی- عددی نوینی برای ارزیابی تعامل هیدرولیکی بین تونل‌ها و آب‌های زیرزمینی معرفی شده است [۱۱]. تأثیر تونل بر سطح آب‌های زیرزمینی توسط بونومی و بلینی<sup>۶</sup> مورد بررسی قرار گرفت و یک روش مدل‌سازی عددی نیز برای پیش‌بینی آن ارائه شد [۱۲]. در پژوهشی دیگر،

می‌کند و امکان دارد در نهایت به نشست سطح زمین منجر شود [۲].

هجوم آب به داخل فضای حفر شده، یکی دیگر از مشکلات اساسی در حفر تونل‌های واقع در زیر سطح ایستایی است [۳]. این عامل نیز مهندسین طراح را در تعیین دقیق سرعت پیشروی و طراحی سامانه نگهداری در حین برنامه‌ریزی و طراحی پروژه دچار مشکل می‌کند. بنابراین به دلیل تأثیر مستقیم این پدیده‌ها بر سایر مراحل عملیات حفر، محاسبه میزان نرخ نفوذ آب به داخل تونل و مدیریت ریسک مخاطرات حاصل از آن، بسیار ضروری است. از جمله مواردی که در این زمینه موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی می‌شود، عدم مدیریت لازم برای کنترل نشت آب ورودی به تونل است [۴]؛ به‌طوریکه عدم مدیریت لازم، در برخی موارد موجب توقف کامل عملیات حفر، نشست در سطح ایستایی و خشک شدن قنات‌ها و چشمه‌های پایین‌دست محدوده حفر تونل می‌شود که عدم توجه به این مسائل، پیامدهای ناگواری را در پی دارد.

به‌منظور پیشگیری از این عوارض مخرب، ضروری است که با انجام محاسبات و تحلیل مدل‌های متنوع، جنبه‌های مختلف آنها مشخص شده و در راستای جلوگیری از سوانح آتی و کاهش صدمات احتمالی نیز گام‌های سازنده‌ای برداشته شود. در پژوهش حاضر، سعی شده است تا به تحلیل و ارزیابی اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی پرداخته و همچنین راهکارهایی برای کاهش این اثرات در تونل بزرگ مقطع راه‌آهن کوهین (محور قزوین- رشت) ارائه شود.

## ۲- پیشینه پژوهش

در خصوص تحلیل عددی حفر تونل‌های واقع در زیر سطح ایستایی و نیز ارزیابی اثرات مخرب زیست‌محیطی این نوع سازه‌ها، مطالعات ارزنده‌ای انجام

<sup>۱</sup>- Cesano

<sup>۲</sup>- Bolmen tunnel

<sup>۳</sup>- Lee and Nam

<sup>۴</sup>- Molinero

<sup>۵</sup>- Maréchal and Perrochet

<sup>۶</sup>- Bonomi and Bellini

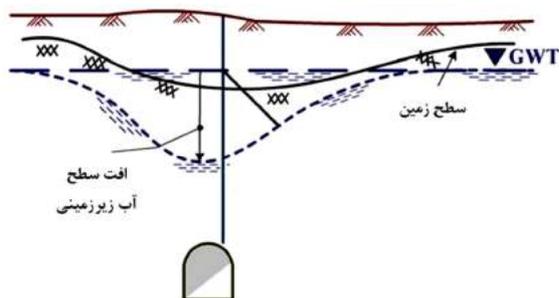
زیرزمینی با حالت پایدار به تونل متروی تبریز (خط ۲) با در نظر گرفتن ویژه ابعاد مدل پرداختند [۲۴]. در پژوهشی دیگر نیز، رویکرد تحلیلی- عددی جدیدی برای جریان آب‌های زیرزمینی (با توجه به فاکتور زمان) در تونل‌هایی که توسط سپر در زیر سطح ایستابی حفاری می‌شوند، ارائه شد [۲۵].

### ۳- اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در اثر حفر تونل

در این پژوهش، اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در اثر حفر تونل‌های بزرگ‌مقطع که شامل دو پدیده نشست سطح زمین در سطح ایستابی و خشک شدن یا کم‌آب شدن چشمه‌ها و قنات‌های پایین‌دست محدوده حفر در اثر خروج آب از تونل حین حفر می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۳-۱- نشست زمین در سطح ایستابی

از جمله مشکلات موجود در حفر تونل‌های واقع در زیر سطح ایستابی می‌توان به کاهش ضریب پایداری ساختاری توده‌سنگ و افت سطح ایستابی در لایه‌های روباره تونل اشاره کرد که باعث نشست تحکیمی می‌شود. با پایین آمدن تراز آب زیرزمینی، نشستی در سطح زمین و بسته به نوع خاک و سنگ به صورت آنی یا تدریجی رخ می‌دهد. نمای شماتیک تونل و افت سطح آب زیرزمینی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای شماتیک تونل واقع در زیر سطح ایستابی و افت سطح آب زیرزمینی [۲۶]

اثرگذاری نرخ پیشروی حفاری تونل بر تنش‌های وارده ناشی از نشست جریان آب به داخل تونل مطالعه شد [۱۳]. کولیمباس و واگنر<sup>۷</sup>، نشست آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها را به روش تحلیلی محض مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. یک روش نیمه‌تحلیلی- نیمه‌عددی نیز به منظور تحلیل اثرات جریان آب به داخل تونل ارائه شد [۱۵]. همچنین، مطالعات مرتبط با ورود جریان‌های آب زیرزمینی به داخل تونل‌ها مطالعه شده و یک سامانه جدید جمع‌آوری آب برای زهکشی از تونل‌ها معرفی گردید [۱۶]. مون و فرناندز<sup>۸</sup> نیز تأثیر افت سطح آب زیرزمینی ناشی از خاکبرداری بر جریان ورودی تونل در یک توده‌سنگ درزه‌دار را تحلیل کردند [۱۷].

زارعی و همکاران، اثرگذاری جریان آب‌های زیرزمینی فوق محلی به یک تونل سنگی را با توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مورد ارزیابی قرار دادند [۱۸]. تحلیل احتمالی خطرات مربوط به آب‌های زیرزمینی در تونل‌های در حال حفاری واقع در زیر سطح ایستابی منطقه نیز در مطالعه‌ای دیگر مورد بررسی قرار گرفت [۱۹]. همچنین ورود آب‌های زیرزمینی با حالت پایدار به یک تونل با مقطع دایروی مطالعه و ارزیابی گردید [۲۰]. در پژوهشی دیگر، ارزیابی ریسک نفوذ آب در تونل‌های کارستی به روش‌های عددی بررسی شد [۲۱]. فونت‌کاجو<sup>۹</sup> و همکاران نیز ارزیابی اثر مانع ناشی از ساخت‌وسازهای زیرزمینی بر آبخوان‌های زیرزمینی متخلخل با شیب هیدرولیک کم را انجام داده و در قالب یک مطالعه موردی، حفاری تونل متروی بارسلون (واقع در اسپانیا) را مورد تحلیل قرار دادند [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر که در سال ۲۰۱۶ انجام گرفت، اثرگذاری سازه‌های زیرزمینی بر جریان آب‌های زیرزمینی شهری مرور شد [۲۳]. حسنی و همکاران، به تحلیل عددی ورود آب‌های

<sup>7</sup>- Kolymbas and Wagner

<sup>8</sup>- Moon and Fernandez

<sup>9</sup>- Font-Capo

نشست ارائه کرد که نمونه‌ای از این کار توسط اوتنو انجام شد. ملیس نیز با به‌کارگیری اکثر روش‌های مورد اشاره، روش مدل‌سازی، میزان نشست سطحی را پیش‌بینی کرد [۲۹]. مقدار عمده نشست سطح زمین در حفر تونل‌ها در اثر سست شدن توده خاک و در برخورد با لایه آبدار پدید می‌آید که با پایین انداختن تراز آب زیرزمینی این مقدار افزایش می‌یابد. محاسبه نشست زمین به این دلیل حائز اهمیت است که علاوه بر خسارات وارده بر سازه‌های واقع در سطح زمین، ممکن است باعث ایجاد خسارت برای بخش‌های زیرزمینی نیز شود و در نظر نگرفتن این پدیده در محاسبات و طراحی، می‌تواند خطاها و خطرات غیرقابل‌قبولی را در بر داشته باشد [۳۰].

چنانچه در طول عملیات حفر تونل به لایه آبدار برخورد شود، در این‌صورت باید تراز آب در آن منطقه به‌صورت موقتی یا دائمی و با احداث شبکه زهکش پایین انداخته شود. اگر تراز آب به‌صورت دائمی پایین انداخته شود، نشست زمین به‌دلیل کاهش یافتن فشار آب حفره‌ای تبدیل شدن تمام تنش به تنش مؤثر و اگر به‌صورت موضعی این عمل صورت پذیرد، مشکلاتی همچون عمل کردن خود تونل به‌عنوان زهکش و یا شکل‌گیری و آرایش مجدد دانه‌های رس (در لایه‌های رسی) بر اثر بالا آمدن دوباره تراز آب زیرزمینی به‌وجود آید که خود این عوامل باعث نشست زمین می‌شود. در نهایت، یک قسمت یا تمام این نشست‌ها به سطح زمین منتقل شده و مشکلاتی را برای سازه‌های واقع در سطح زمین به‌وجود می‌آورد [۳۱]. در مبحث تحکیم خاک می‌توان به نشست و یا جابه‌جایی تدریجی خاک در اثر حذف تدریجی فشارهای منفذی اشاره کرد؛ به‌طوری‌که تغییر فشار منفذی سبب تغییر فشار مؤثر می‌شود که به تبع آن پاسخ خاک را تغییر می‌دهد. این پدیده به‌همراه افت فشارهای منفذی باعث نشست در سطح ایستایی می‌شود که خود باعث تغییر در جریان آب زیرزمینی در منطقه می‌شود.

### ۳-۲- خشک شدن یا کم‌آب شدن قنات‌ها و چشمه‌های

#### پایین‌دست محدوده حفر تونل

محیط زمین در ابتدا تحت تنش ناشی از تنش‌های طبیعی زمین است که بر اثر حفر تونل یا سایر سازه‌های زیرزمینی، وضعیت تنش و توزیع آن در زمین تغییر می‌کند. این امر موجب انقباض دهانه تونل و تغییر شکل‌هایی در مقطع زمین و در نهایت، منجر به نشست سطح زمین می‌شود. مسأله نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل با توجه به اهمیتی که دارد، همواره از سوی پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان آن را قبل از شروع عملیات ساخت برآورد کنند [۲۷].

در حالت کلی، روش‌های محاسبه نشست به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی. در روش تجربی برای حالت‌های مختلف شکل و ابعاد فضای حفر شده، نمودار و جدول‌هایی تهیه شده است که براساس آن نشست سطح زمین را پیش‌بینی می‌کنند. از جمله مهم‌ترین روش‌های تحلیلی برآورد نشست زمین نیز می‌توان به روش <sup>۱۰</sup> NCB اشاره کرد [۲۸]. روش‌های بابت <sup>۱۱</sup>، اوتنو و مویا <sup>۱۲</sup>، گونزالز و ساگاستا <sup>۱۳</sup>، لوگاناتان و پولوس <sup>۱۴</sup>، پارک <sup>۱۵</sup>، ورویجت و بوکر <sup>۱۶</sup> و ملیس <sup>۱۷</sup> نیز از دیگر روش‌های تحلیلی محاسبه نشست محسوب می‌شوند [۲۹]. از سوی دیگر، روش‌های پیش‌بینی نشست به سه دسته، روش‌های تجربی، تابع تأثیر و تابع پروفیل تقسیم شده‌اند. روش‌های تابع تأثیر و تابع پروفیل جزو روش‌های ریاضیاتی محسوب می‌شوند که در آنها با به‌کارگیری توابع مختلف (توابع نمایی و تانژانت‌های پریپربولیک)، مقدار نشست محاسبه می‌شود. با در دست داشتن پارامترهای ژئومکانیکی، می‌توان با مدل‌سازی در نرم‌افزارهای عددی، پیش‌بینی دقیق‌تری از

<sup>10</sup>- National Coal Board

<sup>11</sup>- Bobet

<sup>12</sup>- Oteo and Moya

<sup>13</sup>- Gonzalez and Sagasetta

<sup>14</sup>- Loganathan and Poulos

<sup>15</sup>- Park

<sup>16</sup>- Verruijt and Booker

<sup>17</sup>- Melis

مذکور در ژئوممبران‌ها باعث شده است تا این فرآورده به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در پوشش تونل‌ها به‌کار برده شود و با کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش عمر مفید سبب دستیابی به محیط خشک شود [۳۲].

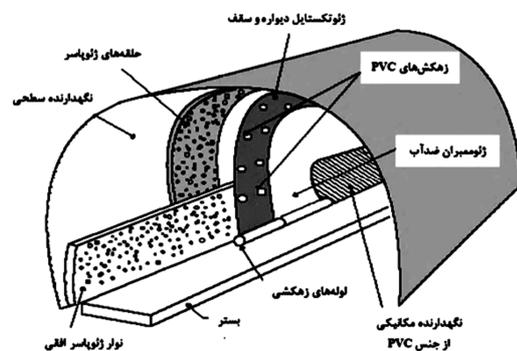
این پوشش‌ها با توجه به خصوصیات منحصر به فردی که دارند، موجب هدایت جریان آب به سمت کانال‌های تعبیه‌شده در پایین تونل شده و از تجمع آب در پشت پوشش جلوگیری می‌کنند. در صورت استفاده از چنین پوشش‌هایی به‌همراه کانال‌های زهکشی به‌منظور خروج آب جمع‌شده در پشت پوشش نهایی تونل راه‌آهن کوهین، جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه تغییر کرده و به‌دنبال آن باعث خشک و یا کم‌آب شدن قنات‌ها و چشمه‌های پایین‌دست می‌شود. رودخانه ملاحی و سرشاخه‌های آن که در بخش شمالی ساختگاه تونل، به‌عنوان زهکش اصلی منطقه در تراز پایین‌تری نسبت به کف تونل قرار دارد و همچنین چند رشته قنات کوچک که در روستای یزدرود به فاصله سه کیلومتری از جنوب ساختگاه تونل واقع می‌باشد، از جمله مواردی هستند که تحت تأثیر این پدیده قرار خواهند گرفت.

### ۳-۳- محاسبه نرخ نفوذ آب به داخل تونل در حال حفر

یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات پیش‌رو در عملیات تونل‌زنی در مقاطع سنگی، جریان یافتن آب به درون محیط تونل در حال حفر است که از طریق ناپیوستگی‌های اولیه و ایجادشده در دیواره تونل صورت می‌پذیرد. جریان آب و هجوم آن به محیط تونل حین حفر، آثار مخربی بر روند عملیات حفر داشته و می‌تواند فعالیت تونل‌سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. این مسأله بعضاً به توقف عملیات نیز منجر می‌شود. از جمله مهم‌ترین مشکلاتی که به علت نشت آب به درون محیط تونل گریبانگیر عملیات می‌شود، می‌توان به مواردی همچون کاهش پایداری توده‌سنگ اطراف تونل، اعمال فشار مازاد بر سامانه نگهداری موقت و دائم، تأثیرات تخریبی بر وضعیت ژئومکانیکی سنگ و متعاقباً ایجاد

به‌منظور کنترل آب ورودی به خارج از تونل می‌توان از پوشش‌های ناتراوا موسوم به ژئوسنتتیک‌ها (ژئوممبران‌ها<sup>۱۸</sup> و ژئوکمپوزیت‌ها<sup>۱۹</sup>) بهره برده و این فرآورده‌های پلیمری را به‌همراه کانال‌هایی در پایین دو طرف دیواره تونل در پشت پوشش نهایی استفاده کرد (شکل ۲). ژئوممبران‌ها و ژئوکمپوزیت‌ها صفحات یکپارچه ساخته شده از پلیمر هستند. این فرآورده‌های ورقه‌ای، به‌طور نسبی نفوذناپذیر و مصنوعی می‌باشند که از مصالحی با نفوذپذیری پایین ساخته شده‌اند تا به‌صورت یک حایل، روکش یا آستر از عبور آب جلوگیری نمایند [۳۲].

ضریب نفوذپذیری بسیار اندک این غشاها که در حدود  $10^{-13} \times 2/7$  سانتی‌متر در ثانیه است، باعث می‌شود این فرآورده جایگزین آسترهای قدیمی متخلخل و نفوذپذیر شود. ورقه‌های ژئوممبران در مقابل قارچ‌ها و کپک‌ها کاملاً مقاوم بوده و اشعه ماورای بنفش و سایر عوامل محیطی هیچگونه تأثیر منفی کیفی بر آنان ندارد.



شکل ۲- نحوه نصب ژئوممبران‌ها در تونل‌های در حال حفر

[۳۳]

ورقه‌های ژئوممبران پلی‌اتیلنی که با روش‌های دوبار تزریق ساخته می‌شوند، ورقه‌های یکپارچه انعطاف‌پذیر و نرمی هستند که ضمن آب‌بند کردن محیط اطراف تونل، به‌دلیل مقاومت بالا در برابر عوامل سوراخ‌کننده (مانند حمله جوندگان و ریززیستواره‌ها) پایدار می‌مانند. قابلیت

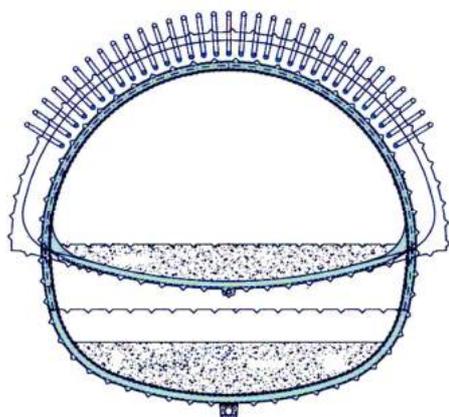
<sup>18</sup>- Geomembrane

<sup>19</sup>- Geocomposite

پس از حفر تونل تا قبل از نصب پوشش نهایی، سطح آب زیرزمینی به علت نشت از دیواره‌ها تا ابتدای قوس فوقانی تونل افت می‌کند؛ ولی در ادامه، بعد از نصب پوشش نهایی، به علت آب‌بند بودن پوشش، مجدداً سطح آب با گذشت زمان تا مقدار اولیه بالا می‌رود و در پشت پوشش جمع می‌شود. این امر علاوه بر بازیابی مجدد سطح ایستابی باعث اعمال فشار قابل توجه به پوشش نهایی خواهد شد.

#### ۴-۲- استفاده از روش لوله‌رانی (فورپولینگ)

برای حفاری یک تونل در شرایط بد زمین، پایدار نگه داشتن جبهه‌کار تونل و جلوگیری از نشت آب به داخل تونل از پیرامون مقطع آن، امری بسیار ضروری است. امروزه فورپولینگ<sup>۲۰</sup> که به یکی از روش‌های پرکاربرد در نگهداری حفاریات بزرگ مقیاس تبدیل شده است، در خاک‌های سست، ضعیف و متخلخل و همچنین در مواردی که نشست سطح زمین مجاز نباشد، کاربرد دارد. در این روش، یک پوسته قوس‌مانند چتری بالای جبهه‌کار و اطراف مقطع تونل قبل از حفر ایجاد می‌شود تا عملیات به‌طور ایمن و سریع انجام شود. روش‌های مختلف شامل تزریق فشار<sup>۲۱</sup>، لوله‌رانی در سقف<sup>۲۲</sup> و مهارگذاری در جبهه‌کار<sup>۲۳</sup> می‌باشند [۳۷]. در شکل‌های ۳ و ۴، نمایی از روش لوله‌رانی نشان داده شده است.



شکل ۳- مقطعی از تونل نگهداری شده به روش لوله‌رانی [۲۸]

20- Forepoling

21- Jet Grouting

22- Pipe Roof

23- Spiling

خطرات جانی و مالی اشاره کرد [۳۴]. مسأله نشت و کنترل جریان آب زیرزمینی، از مشکلات اساسی حفر تونل‌های عمیق است که باید از قبل پیش‌بینی شده و به دقت مورد بررسی قرار گیرد [۳۵].

#### ۴- راه‌های کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی

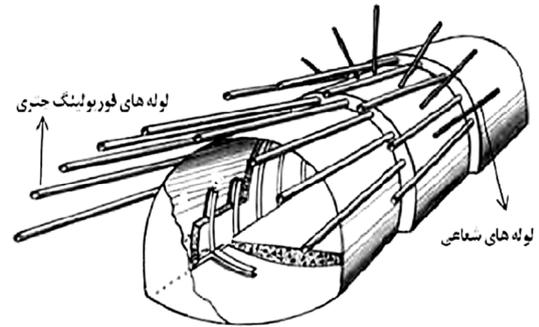
به‌طور کلی، برای کنترل آب زیرزمینی دو روش آبکشی و جلوگیری از ورود آب به درون تونل وجود دارد. روش‌های آبکشی اغلب به فنون جمع‌آوری و انتقال آب برمی‌گردند که روش‌های قدیمی‌تر و معمول‌تری در کنترل آب زیرزمینی هستند. در این روش‌ها اجازه ورود آب به تونل داده می‌شود و سپس آب را از تونل خارج می‌کنند. به همین دلیل به این روش‌ها، روش‌های داخلی نیز گفته می‌شود. پمپاژ منبع باز، پمپاژ چاه‌ها، بالا بردن نقاط چاهی و استفاده از مکنده‌های ونتوری از مرسوم‌ترین روش‌های آبکشی هستند. در روش دیگر کنترل آب زیرزمینی، از ورود آب به درون تونل ممانعت می‌شود. از اینرو این روش‌ها را خارجی می‌نامند. روش‌های خارجی شامل مواد تزریقی سیمانی و شیمیایی و نیز انجماد زمین است [۳۶]. بازیابی مجدد سطح آب زیرزمینی می‌تواند یکی از راه‌های کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی در ساختگاه تونل کوهین باشد؛ به‌طوری که با استفاده از یک پوشش آب‌بند بدون زهکش می‌توان از افزایش نشست در سطح ایستابی در درازمدت و تغییر در روند جریان آب زیرزمینی در منطقه جلوگیری کرد.

#### ۴-۱- بازیابی مجدد سطح آب زیرزمینی با استفاده از

##### پوشش آب‌بند بدون زهکشی

استفاده از پوشش‌های آب‌بند بدون زهکشی به‌منظور کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، مستلزم به‌کارگیری سامانه نگهداری با خصوصیات بالای مقاومتی می‌باشد؛ زیرا در پی بازیابی مجدد سطح آب زیرزمینی، آب در پشت پوشش نهایی جمع شده و در درازمدت باعث اعمال فشار هیدرواستاتیکی قابل توجهی به پوشش می‌شود. به‌طوری که،

مترمربع، یکی از تونل‌های بزرگ‌مقطع کشور محسوب می‌شود. این تونل به‌منظور ایجاد راه ریلی بین شهرهای یادشده در قسمت غربی رشته‌کوه البرز احداث می‌شود. قرارگیری کوه‌های مرتفع در طول مسیر، ساختار ناهموار و کوهستانی منطقه و دارا بودن شیب طولی حداکثر به‌همراه حداقل شعاع قوس‌ها، طراحی و اجرای این پروژه را با چالش‌های جدی روبه‌رو کرده است [۳۹]. شکل‌های ۵ و ۶ نقشه زمین‌شناسی قطعه اول محور قزوین-رشت و منطقه اجرای طرح را نشان می‌دهد. با انجام عملیات حفاری گمانه‌های اکتشافی و شناسایی لایه‌های مختلف زمین با مغزه‌های حاصل از آن، آزمایش‌های لازم برای تعیین مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ دربرگیرنده تونل بر روی نمونه‌های اکتشافی از اعماق مختلف زمین صورت گرفته است. ویژگی‌های ژئومکانیکی منطقه یادشده مورد نیاز برای انجام فرآیند مدل‌سازی عددی شرایط تونل مذکور، در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل آزمایش‌های مکانیک‌سنگی، نشان‌دهنده پایین بودن ویژگی‌های ژئومکانیکی و متوسط بودن نفوذپذیری لایه‌های پوشاننده (روباره) تونل است.



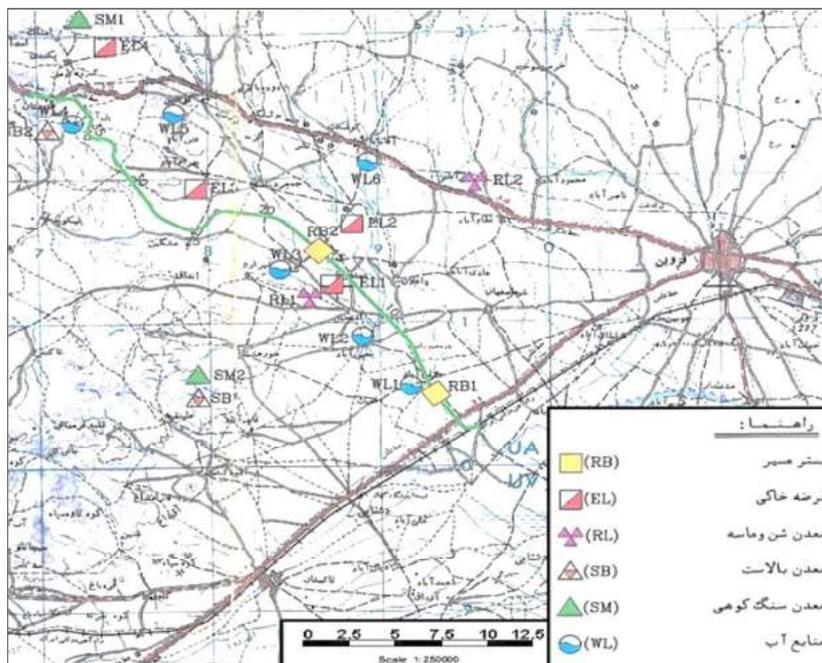
جهت حفاری

شکل ۴- نمایی از روش لوله‌رانی [۲۶]

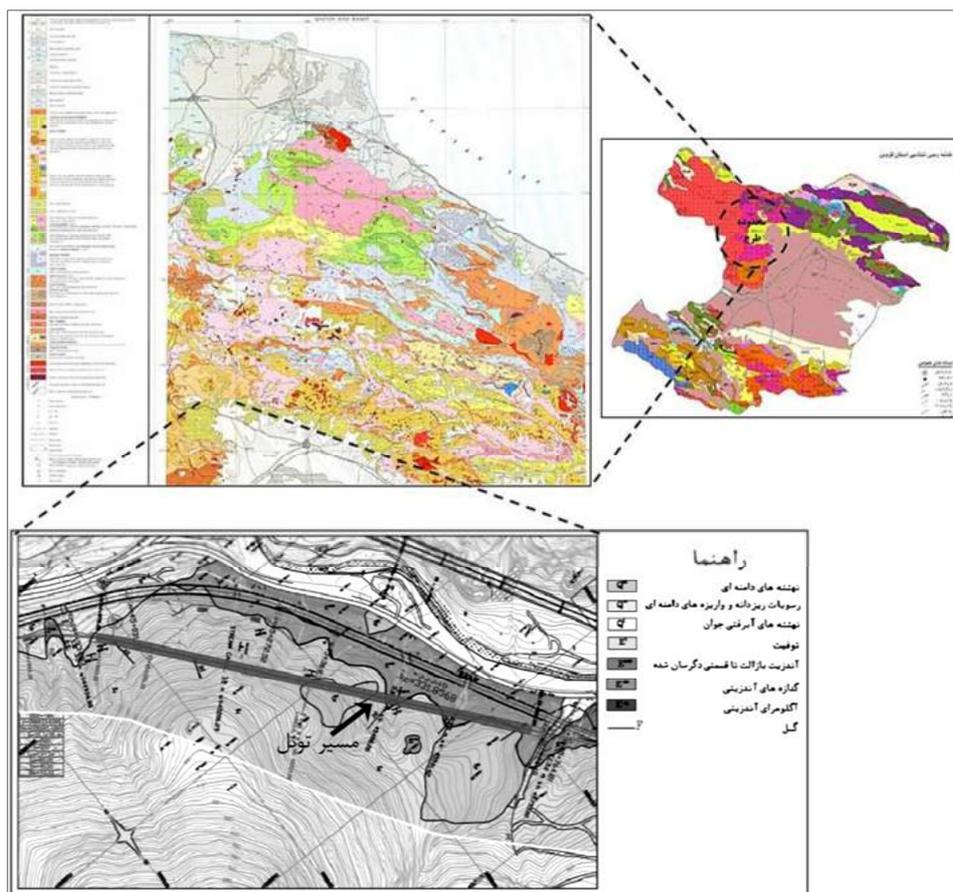
فوربولینگ‌ها، لوله‌هایی هستند که در داخل چال‌هایی که جلوتر از سینه‌کار حفاری شده‌اند، قرار گرفته و از داخل آنها تزریق دوغاب صورت می‌گیرد. این روش در تونل‌سازی، یکی از شیوه‌های بسیار مؤثر افزایش خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها و جلوگیری از نشست زمین در سازه‌های زیرزمینی و نیز پیشگیری از نفوذ جریان‌های آب زیرزمینی به داخل تونل می‌باشد [۳۸].

## ۵- معرفی ساختگاه تونل راه‌آهن کوهین

تونل راه‌آهن کوهین واقع در قطعه اول راه‌آهن قزوین-رشت-بندر انزلی با طول ۱۶۳۵ متر و مقطع ۱۲۱



شکل ۵- موقعیت جغرافیایی تونل کوهین واقع در قطعه اول راه‌آهن قزوین-رشت-بندر انزلی [۴۰]



شکل ۶- نقشه زمین‌شناسی قطعه اول محور قزوین- رشت- انزلی و منطقه اجرای طرح [۴۱]

مجموعه‌ای از عوامل زمین‌شناسی میسر خواهد شد که مهم‌ترین آنها شامل وضعیت هیدروژئولوژی، جنس سنگ‌ها و خصوصیات ساختاری منطقه است.

#### ۵-۲- مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ساختگاه تونل

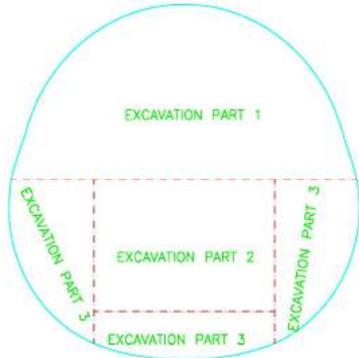
ساختگاه تونل در محدوده کوهین در بخش جنوبی ناحیه رسوبی ساختاری البرز مرکزی قرار دارد. در این منطقه، رسوبات تخریبی- آبرفتی در دامنه ارتفاعات البرز به‌صورت کنگلومرا و نهشته‌های آبرفتی انباشته شده‌اند که نشانگر بالآمدگی زمین و وجود محیط رسوبی قاره‌ای می‌باشد. در مطالعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی عمقی، مشخص شده است که این تونل در رسوبات سازند هزاردره قرار گرفته و جنس زمین پوشاننده آن از تناوب لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار (کنگلومرای ریزدانه) فشرده نشده، ماسه رس‌دار به‌همراه مقداری شن و رس‌سنگ تشکیل شده

#### جدول ۱- خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه تونل کوهین [۳۹]

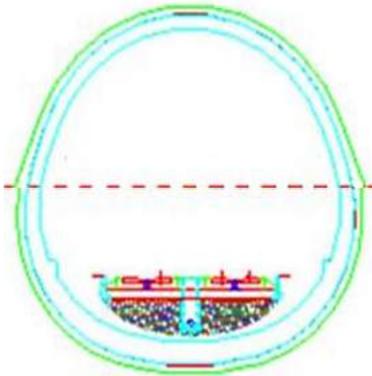
پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>	۲۰۵۰
مدول الاستیسیته ( $E_m$ )	Pa	$3 \times 10^8$
مدول برشی ( $G_m$ )	Pa	$1/0.71 \times 10^8$
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )	درجه	۳۴
چسبندگی ( $C$ )	Pa	$2 \times 10^5$
نسبت پواسون	-	۰/۴

#### ۵-۱- خصوصیات هیدروژئولوژی ساختگاه تونل

قرارگیری بخش اعظم تونل در زیر سطح ایستایی و بزرگی مقطع تونل، از مهم‌ترین ویژگی‌های فنی و مهندسی این تونل محسوب می‌شود. وجود آب‌وهوای نیمه‌گرم و خشک و نیز معتدل تا شدیداً سرد طی فصول مختلف، موجب فرسایش سنگ‌ها و تشکیل لایه هوازده خاک رس به‌صورت یک پوشش کلی در منطقه شده است [۳۹]. مطالعه هیدروژئولوژی منطقه با در نظر گرفتن اثرات



شکل ۷- مقطع شماتیک تونل کوهین [۴۰]



شکل ۸- مقطع تونل پس از نصب سامانه نگهداری و تجهیزات

[۴۰]

## ۶- معرفی ساختگاه تونل راه آهن کوهین

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی میزان نشست و مقدار نفوذ آبدهی زیرزمینی به تونل از نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  استفاده شده است که اساس آن روش عددی تفاضل محدود می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مدل‌های رفتاری پیشرفته و شناخته شده ژئوتکنیکی نظیر مدل غیرخطی موهر-کولمب، مدل دراگر، مدل‌های نرم‌شونده، سخت‌شونده و غیره می‌باشد و قادر است در محیط‌های خاکی و سنگی با تحلیل مدل‌های ساخته شده، جابه‌جایی افقی و قائم نقاط مختلف محیط را تعیین کند. همچنین مدل‌سازی و انجام تحلیل، با فرض رفتار همگن توده سنگ و در یک محیط پیوسته انجام شده است.

در مدل‌سازی، ابعاد مدل‌ها به اندازه‌ای در نظر گرفته شد که محدوده تونل‌ها تحت اثرات ناشی از مرزها قرار نگیرند. به عبارت بهتر، براساس استانداردهای مدل‌سازی موجود، چهار برابر ابعاد تونل، برای محیط مدل‌سازی در

است. خاک‌های سطحی منطقه، بر اثر هوازدگی، حاوی سنگ‌های ماسه‌ای و رسی هستند که به لحاظ دانه‌بندی، ماسه ریزدانه رس‌دار محسوب می‌شوند. داده‌های مغزه‌های اکتشافی حاکی از آن است که کل تونل از تناوب لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار سست، هوازده و فشرده‌نشده، ماسه رس‌دار به همراه مقداری شن، رس و ماسه لای‌دار و ماسه مارنی همراه شن و رس تشکیل شده است [۴۲]. سنگ‌های دربرگیرنده تونل اکثراً شامل توفیت، آندزیت-بازالت است. واحد آندزیت-بازالتی تمام تونل را در میان گرفته است. ضخامت لایه‌های آن به‌طور عمومی بین ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر است. واحد توفیت نیز به ضخامت حدود ۳۰ متر بر روی آندزیت قرار دارد [۴۳].

ضلع جنوبی ارتفاعات دربرگیرنده ساختگاه تونل، متأثر از شرایط لایه‌بندی، دارای شیب ملایمی به‌سوی جنوب می‌باشد که بخش شمالی آن نسبت به سمت مقابل، شیب تندتری دارد. رودخانه ملاعلی و سرشاخه‌های آن که در بخش شمالی ساختگاه تونل به‌عنوان زهکش اصلی منطقه در تراز پایین‌تری نسبت به کف تونل قرار دارد، دارای جریان زیرسطحی یا سطحی است. با توجه به حفاری‌های انجام‌شده در منطقه، ارتفاع سطح ایستابی از خط پروژه تونل برای مقطع ۴۰ متری تونل کوهین برابر با ۲۲/۵ متر برآورد شده است [۴۳].

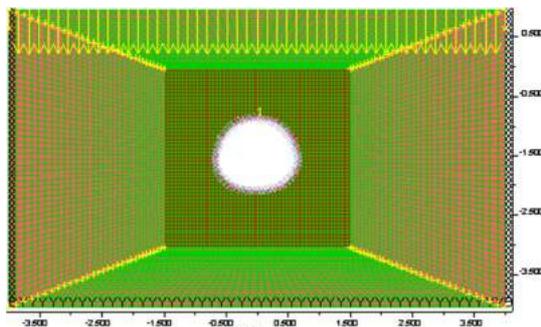
## ۵-۳- عملیات حفر تونل

تونل کوهین با سطح مقطعی به شکل نعل‌اسبی با عرض ۱۳ متر و ارتفاع ۶/۹ متر و طول ۱۶۳۵ متر، جزو پروژه‌های تونل‌زنی مهم کشور محسوب می‌شود. به دلیل بزرگ بودن مقطع تونل، عملیات حفر به چند بخش تقسیم شده است: حفر طاق تونل، پاتاق میانی و حفر پاتاق‌های کناری و کف تونل (شکل‌های ۷ و ۸). به‌منظور حفاری نیز از ماشین‌آلات متداول تونل‌زنی سنتی (بیل مکانیکی و لودر) استفاده می‌شود. علاوه بر سامانه نگهداری موقت که شامل شاتکریت و بعضاً پیچ‌سنگ است، از بتن مسلح به‌عنوان سامانه نگهداری اصلی تونل استفاده می‌شود.

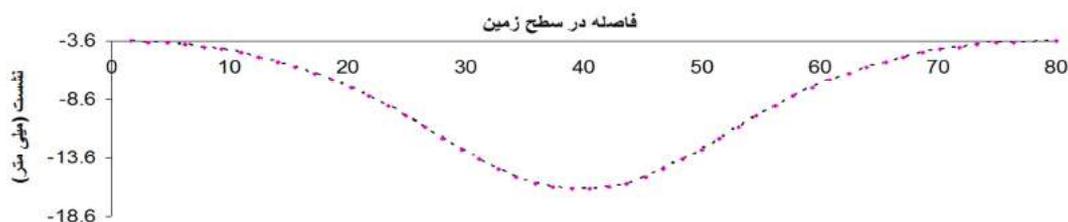
موجود و نیز تنش‌های قائم اعمالی ناشی از وزن مواد روباره، اثرات خود را در مدل اعمال کنند. سپس بخش داخلی تونل در مقطع ۴۰ متری در چند فاز مختلف (مطابق با عملیات حفر تونل) حذف شد تا شرایط حفر تونل به صورت دقیق مدل‌سازی شود. براساس تحلیل‌های حساسیت انجام شده مقدار  $K=0/5$  (نسبت تنش افقی به قائم) در نظر گرفته شده است. بر مبنای این تحلیل‌ها، به‌ازای مقادیر مختلف  $K$ ، مدل ساخته‌شده اجرا گردید و خروجی‌های حاصل از آنها، با توجه به وزن مخصوص سنگ‌های روباره تونل، ارتفاع روباره و عمق تونل مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  برای مقطع ۴۰ متری (۴۰ متر روباره از مرکز تونل تا سطح زمین) با ارتفاع سطح ایستابی ۲۲/۵ متر از خط پروژه و میزان نشست در سطح ایستابی را نشان می‌دهند. میزان نشست بعد از اتمام عملیات حفر و نصب پوشش نهایی تونل، ۱/۶۲۷ سانتی‌متر برآورد شده است.

نظر گرفته شده است. در حالت کلی، در توده‌سنگ‌های موجود در اعماق زمین تنش‌هایی موسوم به تنش‌های برجا اثر می‌کنند. عامل اصلی این تنش‌ها، وزن طبقات و فعالیت‌های تکتونیکی منطقه است. نسبت تغییرات ابعاد مش‌ها در دو راستای افقی ( $i$ ) و عمودی ( $j$ ) نیز برابر یک در نظر گرفته شد. برای ساخت هندسه تونل، نقشه دقیق مقطع تونل که در نرم‌افزار AutoCAD تهیه شده، وارد محیط نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  شد [۴۲].

به منظور بررسی تغییرات مدل، پیش از اجرای نرم‌افزار، شرایط مرزی اولیه مدل برای حل به روش محدود کردن جابه‌جایی‌ها بسته شدند. در این روش، معمولاً مرز پایینی مدل در دو راستای افقی و عمودی و مرزهای جانبی در راستای عمودی محدود می‌شوند. خواص مواد و مصالح مورد نیاز در مدل نیز مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. ابتدا پیش از مدل‌سازی حفر تونل، بارگذاری بر مدل اعمال شد تا تنش‌های برجای منطقه براساس مؤلفه‌های مهندسی



شکل ۹- مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  برای مقطع ۴۰ متری با ارتفاع سطح ایستابی ۲۲/۵ متر



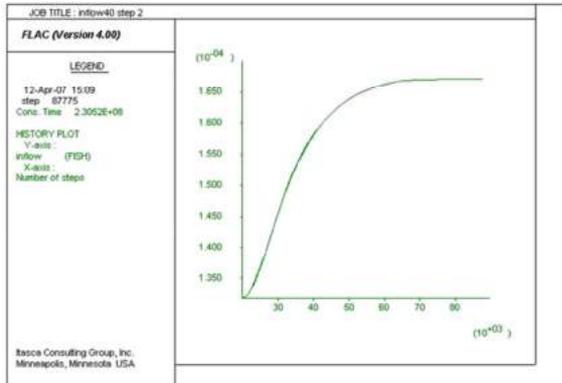
شکل ۱۰- میزان نشست بعد از اتمام حفاری و نصب پوشش نهایی تونل

داخل تونل راه‌آهن کوهین در سه فاز (مطابق با عملیات حفر تونل) بررسی شده است. شکل ۱۱، نمودار تغییرات دبی آب ورودی نسبت به سیکل محاسباتی و شکل ۱۲، کنتورهای جریان به‌همراه فشارهای منفذی در بخش‌های مختلف حفر تونل را نشان می‌دهند. با توجه به بررسی‌های

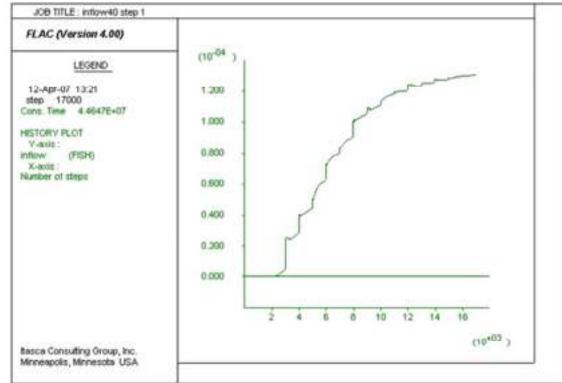
پیش‌بینی نرخ نفوذ آب نیز به داخل تونل راه‌آهن کوهین برای مقطع ۴۰ متری با سطح ایستابی ۲۲/۵ متر از خط پروژه انجام شد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، پارامترهای لازم برای تحلیل جریان سیال برای مقاطع مورد نظر در جدول ۲ درج شده است. میزان نرخ نفوذ آب به

تونل برآورد شده است. بنابراین در چنین شرایطی مدیریت و کنترل آب خروجی امری ضروری است.

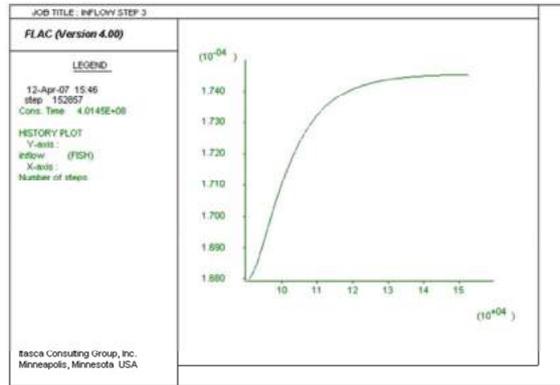
به عمل آمده و باتوجه به جدول ۳، میزان دبی آب ورودی برای مقطع ۴۰ متری برابر با  $1/767$  مترمربع در واحد طول



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۱- نمودار تغییرات دبی آب ورودی به سیکل محاسباتی برای مقطع ۴۰ متری تونل در بخش‌های (الف) نخست، (ب) دوم و (ج) بعد از اتمام عملیات حفر تونل

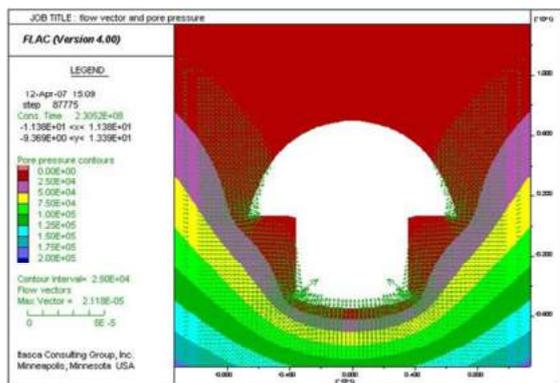
جدول ۳- نتایج دبی آب ورودی در بخش‌های مختلف حفر برای مقطع ۴۰ متری تونل

FLAC <sup>2D</sup> (m <sup>2</sup> /s)	مراحل مختلف حفر
مقطع ۴۰ متری	
$1/313 \times 10^{-4}$	حفر طاق تونل
$1/674 \times 10^{-4}$	حفر پاتلاق میانی
$1/767 \times 10^{-4}$	حفر پاتلاق کناری

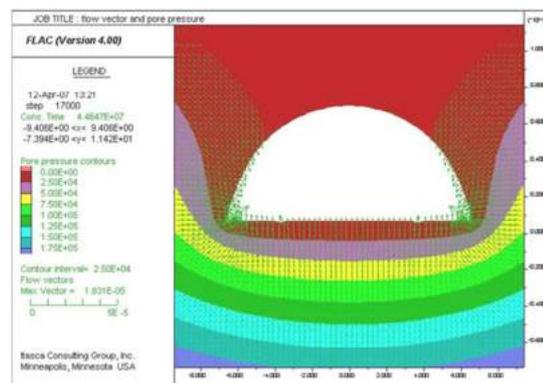
مدل ساخته شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. با توجه به نیروها و گشتاور خمشی اعمال شده لازم است تا از پوشش نهایی با مقاومت بالاتری در مقایسه با روش قبل استفاده شود که این امر موجب بالا رفتن هزینه نگهداری می‌شود.

جدول ۴ و شکل ۱۳ به ترتیب نیروها و گشتاور خمشی ایجاد شده در پوشش نهایی تحت تأثیر فشار آب جمع شده در فضای مابین پوشش نهایی و پوشش اولیه<sup>۲۴</sup> که توسط نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> مدل سازی شده است، به همراه

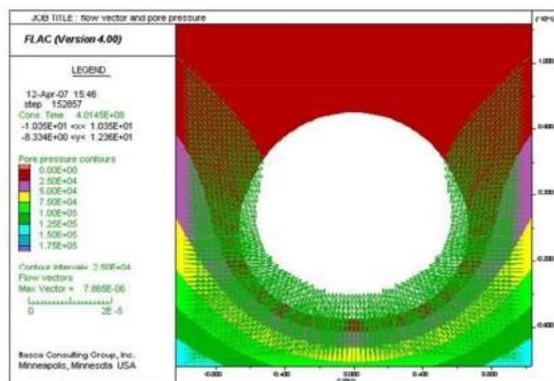
<sup>24</sup>- Gap Pressure



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲- بردارهای جریان به همراه فشارهای منفذی برای مقطع ۴۰ متری تونل در بخش‌های (الف) نخست، (ب) دوم و (ج) بعد از اتمام عملیات حفر تونل

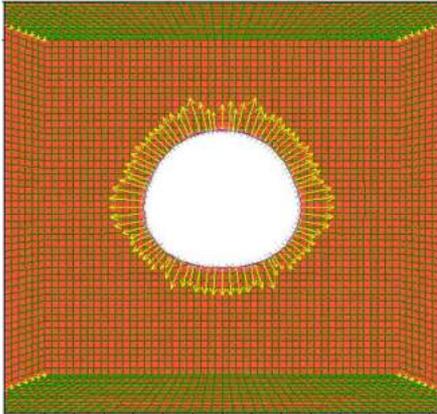
جدول ۴- نیروها و گشتاور خمشی وارده بر نقاط مختلف پوشش تحت تأثیر فشار آب جمع‌شده در فضای مابین پوشش نهایی و پوشش اولیه

$V_{max}$ (ton)	$M_{max}$ (ton-m)	$T_{max}$ (ton)	نقاط مختلف پوشش
۹/۳	۱/۸	۱۵۶/۲	بالای قوس فوقانی
۱/۵۷	۱/۰۵	۱۷۱/۳	۱/۴ قوس فوقانی
۸/۸	۵/۹	۱۷۳/۷	ابتدای قوس فوقانی
۴/۱۶	۲۸/۲	۱۸۷	۱/۴ قوس تحتانی
۱۰/۶۷	۴۷/۲	۱۸۰/۵۲	وسط قوس تحتانی

### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نشست در سطح ایستایی، خشک و کم‌آب شدن قنات‌ها و چشمه‌های پایین‌دست در ساختگاه تونل راه‌آهن کوهین به‌عنوان اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، بازیابی سطح آب زیرزمینی با استفاده از پوشش بتنی آب‌بند بدون انجام عملیات زهکشی و نیز به‌کارگیری همزمان روش فورپولینگ، به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه شد که انجام این امر مستلزم

حفر تونل‌ها در زمین‌های آبدار، مشکلات عدیده‌ای را به‌دنبال خواهد داشت. از جمله این مشکلات، می‌توان به کاهش ضریب پایداری ساختاری توده‌سنگ، فرسایش و یا تخریب سامانه‌های نگهدارنده بتنی، ایجاد فشار آب اضافه بر روی پوشش نهایی و افت سطح پیژومتری در لایه‌های خاکی روباره که باعث نشست تحکیمی می‌شود، اشاره کرد.



شکل ۱۳- فشار آب جمع شده در فضای مابین پوشش نهایی و پوشش اولیه تونل در مدل ساخته شده در نرم افزار  $FLAC^{2D}$

استفاده از پوشش بتنی با خصوصیات مقاومتی بالا به منظور تحمل فشار هیدرواستاتیکی آب جمع شده در پشت پوشش است.

## مراجع

- [1] Roccheggiani, M., Piacentini, D., Tirincanti, E., Perissin, D., & Menichetti, M. (2019). "Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using Sentinel-1 SAR Interferometry", *Remote Sensing*, 11(6), 639.
- [2] Gu, S. C., Sun, W., & Wang, B. (2019). "Study on the subdivision support and rapid tunneling technology of coal mine roadway", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 242, No. 2, p. 022018). IOP Publishing.
- [3] Yang, S. Y., & Yeh, H. D. (2007). "A closed-form solution for a confined flow into a tunnel during progressive drilling in a multi-layer groundwater flow system", *Geophysical research letters*, 34(7).
- [4] Zaidel, J., Markham, B., & Bleiker, D. (2010). "Simulating seepage into mine shafts and tunnels with MODFLOW", *Groundwater*, 48(3), 390-400.
- [5] Cesano, D., Olofsson, B., & Bagtzoglou, A. C. (2000). "Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel in southern Sweden", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 153-165.
- [6] Lee, I. M., & Nam, S. W. (2001). "The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(1), 31-40.
- [7] Tseng, D. J., Tsai, B. R., & Chang, L. C. (2001). "A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(3), 175-183.
- [8] Shin, J. H., Addenbrooke, T. I., & Potts, D. M. (2002). "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour", *Geotechnique*, 52(6), 391-403.
- [9] Molinero, J., Samper, J., & Juanes, R. (2002). "Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks", *Engineering Geology*, 64(4), 369-386.
- [10] Selroos, J. O., Walker, D. D., Ström, A., Gylling, B., & Follin, S. (2002). "Comparison of alternative modeling approaches for groundwater flow in fractured rock", *Journal of Hydrology*, 257(1-4), 174-188.
- [11] Maréchal, J. C., & Perrochet, P. (2003). "Nouvelle solution analytique pour l'étude de l'interaction hydraulique entre les tunnels alpins et les eaux souterraines", *Bulletin de la Société Géologique de France*, 174(5), 441-448.
- [12] Bonomi, T. U. L. L. I. A., & Bellini, R. O. B. E. R. T. A. (2003). "The tunnel impact on the groundwater level in an urban area: a modelling approach to forecast it", *Materials and Geoenvironment*, 50, 45-48.
- [13] Lee, I. M., & Nam, S. W. (2004). "Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(3), 273-281.
- [14] Kolymbas, D., & Wagner, P. (2007). "Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 23-27.
- [15] Hwang, J. H., & Lu, C. C. (2007). "A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 39-46.
- [16] Li, D., Li, X., Li, C. C., Huang, B., Gong, F., & Zhang, W. (2009). "Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 260-268.
- [17] Moon, J., & Fernandez, G. (2010). "Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass", *Engineering Geology*, 110(3-4), 33-42.

- [18] Zarei, H. R., Uromeihy, A., & Sharifzadeh, M. (2011). "Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 364-373.
- [19] Jurado, A., De Gaspari, F., Vilarrasa, V., Bolster, D., Sánchez-Vila, X., Fernández-García, D., & Tartakovsky, D. M. (2012). "Probabilistic analysis of groundwater-related risks at subsurface excavation sites", *Engineering Geology*, 125, 35-44.
- [20] Butscher, C. (2012). "Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 158-167.
- [21] Li, S. C., Zhou, Z. Q., Li, L. P., Xu, Z. H., Zhang, Q. Q., & Shi, S. S. (2013). "Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system", *Tunnelling and underground space technology*, 38, 50-58.
- [22] Font-Capo, J., Pujades, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Velasco, V., & Montfort, D. (2015). "Assessment of the barrier effect caused by underground constructions on porous aquifers with low hydraulic gradient: A case study of the metro construction in Barcelona, Spain", *Engineering geology*, 196, 238-250.
- [23] Attard, G., Winiarski, T., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2016). "Impact of underground structures on the flow of urban groundwater", *Hydrogeology journal*, 24(1), 5-19.
- [24] Hassani, A. N., Katibeh, H., & Farhadian, H. (2016). "Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1617-1627.
- [25] Liu, X. X., Shen, S. L., Xu, Y. S., & Yin, Z. Y. (2018). "Analytical approach for time-dependent groundwater inflow into shield tunnel face in confined aquifer", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(4), 655-673.
- [26] Yoo, C., Kim, S. B., Kim, J. W., & Yoo, K. H. (2008). "Influencing factors on groundwater drawdown induced ground settlement during tunneling", *In: World Tunneling Congress*, 863-871.
- [27] Pakbaz, M., & Heydarizadeh, Y. (2008). "Investigation of soil subsidence in excavation of Ahwaz urban tunnel", 4<sup>th</sup> National Congress of Civil Engineering. University of Tehran. Tehran.
- [28] National Coal Board. (1975). *Subsidence Engineering Handbook*. National Coal Board mining Department, London, 1975.
- [29] Rostami, A.R., Rostamabadi, S.A., Hosseini, N., & Khosrowash, M. (2011). "Numerical and analytical estimating of ground subsidence and comparison with the result of observational and instrumental method (case study: second line of Karaj subway tunnel)", *Journal of Earth and Resources*. 4, 3(12), 33-40.
- [30] Ahmadvand, M., Azadi, M.A., & Soltani, J. (2012). "Groundwater modeling due to groundwater level drop (case study: sewage tunnel drainage of East-Tehran)", 1<sup>th</sup> National Conference on Sustainable Development Solutions. Tehran.
- [31] Honestly, B., Shahriar, K., & Khoshrovan Azar, A.S. (2004). "Analytical estimation of tunneling in urban areas (case Study: first phase of Tabriz metro)", 2<sup>nd</sup> Conference of Iranian Rock Mechanics.
- [32] Setayesh, A.S. (2011). *Introduction to Geosynthetics*. Academic Center for Education, Culture and Research publications (Jahad-e Daneshgahi) First edition. Tehran.
- [33] Mahuet, G.L. (2005). *Guidelines on Waterproofing and Drainage of Underground Structures*. Version 1 – approved by Technical Committee. Tunneles et Souterrains – HORS-SERIE N2.
- [34] A'li Anvari, A., Katibeh, H., & Mahmoudabadi, H. (2008). "Estimation of equivalent permeability along the axis of the Amir-Kabir tunnel using artificial neural network", 2<sup>nd</sup> Conference of Iranian Mining Engineering. University of Tehran. Tehran.
- [35] Sadeghpour, A.H., & Fadaei, M. (2009). "Investigation of subsidence control methods in excavation operations adjacent to groundwater level", 8<sup>th</sup> International Congress of Civil Engineering. Shiraz University. Shiraz.
- [36] Qasemi ghodrat, M., & Kazemi, M. (2012). "Methods for controlling water entry into the tunnel and its drainage (Case study: Amir-Kabir water transmission tunnel)", 4<sup>th</sup> Conference of Iranian Mining Engineering. University of Tehran. Tehran.
- [37] Rahimi Dizaji, M., & Pourrahimian, Y. (2006). "Study and simulation of the forepoling method in tunnel excavation", 5<sup>th</sup> Student Conference on Mining Engineering.
- [38] Dezianin, H.R., & Daray, R. (2009). "Using forepoling method for digging of 2-A part of Shibli tunnel with view on geotechnical characteristics of the tunnel site", 6<sup>th</sup> Conference of Iranian Geological Engineering and Environmental.
- [39] Haraz Rah Consulting Engineers. (2004). 2<sup>nd</sup> report of Kouhin railway tunnel in Qazvin-Rasht-Bandar Anzali (Technical Report).
- [42] Hedayat-nasab, K., Adib, A., Goshtasebi, K., & Monjezi, M. (2013). "Validation of geotechnical data of Qazvin-Rasht railway tunnel using recursive analysis of monitoring data", *Journal of Engineering Geology*. 7(1), 1725-1742.
- [41] Rahimi, B., Shahriar, K., & Sharifzadeh, M. (2008). "The process of selecting underground design methods", *Journal of Iranian Tunnel Association Magazine*. 5, 9-17.

- [42] Haraz Rah Consulting Engineers (2008). Report of the part 1 of Qazvin-Rasht railway infrastructure operation. Vol. 2. Part 2. Tunnel private technical specifications. 121 p.
- [43] Haraz Rah Consulting Engineers. (2006). Number 1 report of general, tectonic and engineering geological of Qazvin-Rasht railway. (Technical Report).



## ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیل عددی اثر استفاده از باطله‌های معدنی سیلیمانیت به عنوان درشت‌دانه بر مقاومت لغزشی و سختی مخلوط آسفالتی

سیلیمانیت یک ماده معدنی ارزان‌قیمت با ترکیباتی شامل اکسید آهن، سیلیسیم اکسید و آلومینیوم اکسید می‌باشد. استفاده از آهن، سیلیس و آلومینیوم در صنعت روسازی به‌عنوان مصالح سنگی درشت‌دانه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داشته است. در این تحقیق، اثر استفاده از مصالح سنگی سیلیمانیتی به‌عنوان جایگزین مصالح آهکی درشت‌دانه بر روی پارامترهای مدول برجهندگی، مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، مدل‌سازی با تکیه بر رفتار ویسکوالاستیک لایه‌ها و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام شد، تا تأثیر در تغییرات مدول الاستیسیته ناشی از تغییر جنس مصالح سنگی بر واکنش روسازی تعیین شود. نتایج نشان داد که استفاده از مصالح سنگی سیلیمانیتی در مخلوط آسفالتی، درصد قیر بهینه کمتری نسبت به مصالح آهکی دارد؛ و همچنین مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی در درصد قیر بهینه ۱۵٪ و مدول برجهندگی ۲۵٪ نسبت به مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی افزایش داشته است. استفاده از مصالح سیلیمانیتی در مخلوط آسفالتی به‌دلیل سختی زیاد نسبت به مصالح آهکی می‌تواند باعث افزایش مقاومت اصطکاکی رویه آسفالتی در برابر سایش ناشی از عبور بارهای ترافیکی شود. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه سیلیمانیتی به‌عنوان درشت‌دانه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کرنش کششی بحرانی زیر لایه رویه ندارد.

**واژگان کلیدی:** مخلوط آسفالت گرم، مقاومت لغزندگی، مدول برجهندگی، تحلیل عددی، سیلیمانیت.

حسن محمدی انائی

دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

hasanmohamadi@stu.yazd.ac.ir

محمد مهدی خبیری\*

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

mkhability@yazd.ac.ir

حامد خانی سانج

استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

khani@yazd.ac.ir

فاطمه متین قهفرخی

دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

matin@stu.yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

راهسازی می‌باشد. انتخاب و نوع مصالح سنگی مصرفی بر عملکرد مخلوط آسفالتی و پاسخ روسازی در برابر بارهای ترافیکی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارد؛ و همچنین مقاومت در برابر لغزندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات روسازی آسفالتی در ارتباط با ایمنی می‌باشد. مصالح آهکی به خاطر جذب قیر و عدم حساسیت رطوبتی بیشترین کاربرد را در راه‌های ایران دارند. این مصالح دارای سختی در

افزایش عمر روسازی و اجرای رویه‌ای مقاوم در برابر آمدوشد زیاد، بار سنگین، تغییرات شرایط محیطی و ایجاد سطحی غیرلغزنده مورد توجه محققین مختلف در حوزه

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۶.

(DOI): 10.22091/cer.2019.4355.1151 شناسه دیجیتال

از مدیران راه‌های ملی و طراحی روسازی استفاده از آن را در فرآیند طراحی توصیه می‌کنند [۹]. در این تحقیق از سیلیمانیت به‌دلیل مقاومت فشاری و پایداری حرارتی بالا و همچنین سختی نسبتاً زیاد برای بهبود خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه آهکی استفاده شد. اثر استفاده از مصالح سنگی سیلیمانیتی با استفاده از آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت لغزندگی در ۴ دمای مختلف ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. برای سنجش عملکرد رویه آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی، روسازی آسفالتی با استفاده از نرم‌افزار امان محدود مدل‌سازی شد و کرنش کششی زیر لایه رویه به‌عنوان معیار خرابی در طرح فاکتوریل<sup>۲</sup> به‌عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مروری بر مطالعات پیشین

چن<sup>۳</sup> و همکاران، در تحقیقی از سنگ معدن مگنتیت با عیار پایین به‌عنوان مواد جاذب ریزموج (میکرو و یو) برای ضدیخ کردن آسفالت استفاده کردند و دریافتند که خواص سنگ‌دانه‌های مگنتیت می‌تواند الزامات روسازی را برآورده سازد [۱۰]. لی<sup>۴</sup> و همکاران، ویژگی‌های مخلوط آسفالتی حاوی پسماند سنگ معدنی آزبست را در دماهای بالا و پایین و مقاومت در برابر نفوذ آب ارزیابی کردند که نتایج نشان داد مخلوط‌های آسفالتی حاوی پسماند سنگ معدنی آزبست با فراهم کردن الزامات مورد نیاز می‌تواند راهی برای بهره‌برداری وسیع از پسماند سنگ معدنی آزبست در مخلوط‌های آسفالتی باشد [۱۱]. پژوهشگران در تحقیقی دیگر به بررسی امکان استفاده هم‌زمان از سنگ‌دانه‌های درشت گنیس<sup>۵</sup> و سرباره فولادی ریزدانه<sup>۶</sup> در مخلوط آسفالت پرداختند و عملکرد مخلوط

حدود سه تا چهار در مقیاس موس<sup>۱</sup> هستند که عدد پایینی است و به‌مرور زمان بر اثر بار ترافیک، زبری خود را از دست می‌دهند [۱]. استفاده از مصالح با سختی نسبتاً بالا می‌تواند باعث بهبود مقاومت لغزندگی و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارهای ناشی از ترافیک شود. کانی‌شناسی سنگ‌دانه‌ها بر دوام مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار است؛ به‌عنوان نمونه وجود میکا مقاومت مکانیکی مخلوط را تحت تأثیر قرار می‌دهد یا میزان بالای کوارتز و فلدسپارهای قلیایی چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها را کاهش می‌دهد [۲ و ۳]. هوازگی، ترافیک و شرایط اقلیمی از جمله عوامل متعددی هستند که باید در هنگام طراحی مخلوط‌های آسفالتی مدنظر قرار گیرند. اینکه روسازی بتواند چنین شرایطی را بدون خسارت قابل‌ملاحظه‌ای حفظ کند بستگی زیادی به مصالح انتخاب‌شده دارد. اگرچه تلاش زیادی جهت بهبود پیوند بین قیر و سنگ‌دانه‌ها شده است و یا مطالعه خواص بلندمدت قیر جهت کسب اطمینان از وجود سطحی همگن در طولانی‌مدت انجام شده است، اما انتخاب سنگ‌دانه جهت ساخت‌وساز راه در بسیاری از کشورها اساساً وابسته به تجربه، اعتبار و خواص مکانیکی است [۴]. سنگ‌دانه‌های طبیعی بیشترین مواد مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالت هستند و سهم قابل‌توجهی در صرفه‌جویی هزینه‌ها دارند [۵]. سنگ‌دانه‌های گرانیته در بیشتر موارد در تولید مخلوط آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا عملکرد بهتری نسبت به سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، شن و سایر مواد دارند [۶ و ۷]. با این حال، باید در نظر گرفت که پیچیدگی مصالح سنگی و مقدار زیادی از عوامل، مانند مقدار یا نوع مواد معدنی دگرگونی شده می‌تواند مانع از ارتباط مستقیم متغیرهای کانی‌شناسی با خواص مکانیکی بتن آسفالتی شود [۸]. در حالی که آنالیز کانی‌شناسی می‌تواند کمک بزرگی در ارزیابی دوام طولانی‌مدت سنگ‌دانه‌ها باشد، اما تعداد کمی

<sup>۱</sup>- Mohs

<sup>۲</sup>- Factorial Test Design Method

<sup>۳</sup>- chen

<sup>۴</sup>- Li

<sup>۵</sup>- gneiss

<sup>۶</sup>- steel slag fine aggregate

اکسید و ۰/۰۹ درصد اکسید آهن می‌باشد [۱۷]. سیلیمانیت به‌طور گسترده در صنایع آهن، فولاد، صنایع پتروشیمی، برق، سیمان، روی و شیشه استفاده می‌شود. استفاده از ترکیبات سیلیمانیت (سیلیس، آلومینیوم و آهن) در صنعت روسازی به‌عنوان مصالح سنگی و اصلاح‌کننده اصطکاک سطحی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داشته است [۱۸ و ۱۹]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سنگدانه‌های مختلف تأثیرات متفاوتی بر مخلوط‌های آسفالتی داشته است؛ بنابراین در این تحقیق اثر استفاده از باطله‌های معدنی سیلیمانیت به‌عنوان درشت‌دانه بر مقاومت لغزشی و سختی مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳- روش تحقیق و فرآیند آزمایشگاهی

مصالح به‌کار رفته در این تحقیق شامل مصالح سنگی سیلیمانیتی، مصالح سنگی آهکی و قیر خالص می‌باشد. آزمایش‌های انجام‌شده برای بررسی اثر مصالح سیلیمانیتی شامل آزمایش مارشال، مدول برجهنگی و اصطکاک می‌باشد. مشخصات مصالح و نحوه انجام آزمایش‌های مورد نظر در زیر آورده شده است.

#### ۳-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی در آسفالت نقش سازه اصلی برای انتقال بار را ایفا کرده و سطحی برای چسبیدن قیر ایجاد می‌کند [۱۹]. سنگدانه‌های سیلیمانیتی مورد نظر از باطله‌های معدنی سنگ آهن میشدوان بافق یزد تهیه شدند. میزان ذخیره معدن میشدوان در سال ۱۳۸۵ شامل سه بخش شرقی، غربی و مرکزی، به میزان ۱۱۷۵۴۰۰۰ میلیون تن سنگ آهن کم‌عیار پرفسفر با عیار متوسط آهن ۴۹ درصد تخمین زده شده است. در این مجتمع، کارخانه خردایش و دانه‌بندی همراه با سیستم پرعیارسازی مگنت سپراتور و با ظرفیت تولید ۲۵۰ تن در ساعت نصب گردیده و از اواخر سال ۸۶ آغاز به‌کار نموده

آسفالت را با آزمایش‌های مقاومت مارشال، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، مقاومت در برابر رطوبت و مقاومت به تغییرشکل بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از ترکیب گنیس و سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، رطوبت، تغییرشکل را بهبود می‌بخشد [۱۲]. آناستاسیو<sup>۷</sup> و همکاران، در تحقیقی به بررسی محدودیت روش طراحی بتن آسفالتی در مقایسه با مزایای ارائه‌شده توسط تحلیل عمیق خواص مصالح سنگی پرداختند. برای این کار، چهار مخلوط آسفالتی را تحت آزمایش دوام قرار دادند که یافته‌هایشان اهمیت ارزیابی پارامترهای کانی‌شناسی را تأیید می‌کند [۱۳]. محققان به ارزیابی استفاده از سنگدانه دولومیتی در لایه رویه پرداختند. نتایج نشان داد که چسبندگی خوبی بین قیر و سنگدانه وجود دارد و مخلوط آسفالتی طراحی‌شده با سنگدانه دولومیتی مقاومت بهتری در برابر تغییرشکل دائمی دارد [۱۴]. اولواسولا<sup>۸</sup> و همکاران، در پژوهشی از ضایعات معدن مس در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند و دریافتند که مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد پسماند معدن مس بیشترین عدد لغزش، عمق بافت متوسط و حداقل عمق شیارشدگی را دارند [۱۵]. سو<sup>۹</sup> و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با ضایعات شیشه پرداختند و آزمایش‌هایی از جمله مقاومت مارشال، مقاومت لغزشی، انعکاس نور را انجام دادند. نتایج نشان داد که ضایعات شیشه می‌تواند به‌عنوان مصالحی بادوام جهت ساخت روسازی آسفالتی مورد استفاده قرار بگیرد و همچنین مخلوط ساخته‌شده با ضایعات شیشه ضریب اصطکاک بالاتر و انعکاس نور بهتری دارد که برای بزرگراه‌ها مناسب‌تر است [۱۶]. سیلیمانیت یک ماده معدنی طبیعی ارزان‌قیمت شامل ۳۷/۰۸ درصد سیلیسیم اکسید، ۶۳/۱۱ درصد آلومینیوم

<sup>۷</sup>- Anastasio

<sup>۸</sup>- Oluwasola

<sup>۹</sup>- Su

قیر مصرفی از نوع AC 60-70 می‌باشد که از پالایشگاه اصفهان تهیه شده است. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی قیر مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

### ۳-۳- طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها براساس ASTM D1599 انجام گرفت. به‌منظور تعیین قیر بهینه، سنگ‌دانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۶۰-۱۵۰ درجه سلسیوس در گرمخانه حرارت دیده تا کاملاً خشک شوند. قیر نیز تا دمای ۱۳۵ درجه گرم شده و سپس سنگ‌دانه‌ها با درصد‌های مختلف قیر (نسبت به وزن مخلوط) شامل ۴/۵، ۵ و ۵/۵ ترکیب شد. پس از اختلاط کامل قیر با سنگ‌دانه‌ها مخلوط در استوانه مارشال ریخته شده و در هر طرف با ۷۵ ضربه (شبیه‌سازی ترافیک سنگین) کوبیده شد. مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های حاوی مصالح آهکی و نمونه‌های سیلیمانیتی (استفاده از سیلیمانیت به‌عنوان درشت‌دانه) به ترتیب ۵/۴ و ۵ به دست آمد. برای معرفی نمونه‌ها از کدگذاری به‌ترتیب برای مصالح آهکی L و برای نمونه با درشت‌دانه از سیلیمانیت حرف S و نیز عدد بعد از حرف لاتین ده برابر درصد مختلف قیر استفاده شد. به‌عنوان مثال، S45 یعنی نمونه حاوی درشت‌دانه سیلیمانیت با میزان قیر ۴/۵٪ است.

### ۳-۴- بررسی عملکرد مقاومتی

پارامتر نسبت مارشال (نسبت مقاومت به روانی) می‌تواند به‌عنوان عاملی برای تخمین مقاومت و سختی مخلوط به‌کار آید. حتی می‌توان بالاتر بودن نسبت مارشال را متناسب با کمتر بودن احتمال وقوع پدیده شیارشدگی در مخلوط آسفالتی دانست. نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصد‌های قیر ۴/۵، ۵ و ۵/۵ ساخته شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در آب ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شد و تحت آزمایش مارشال قرار گرفتند.

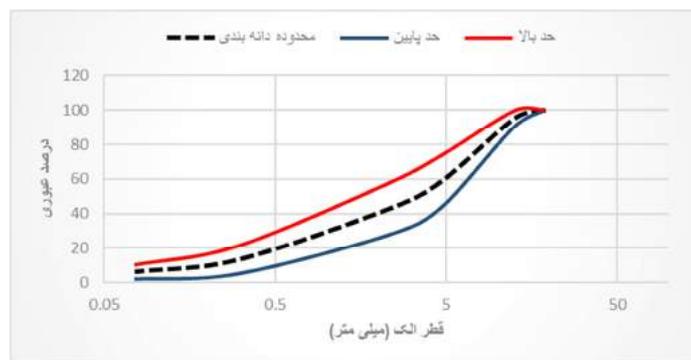
است [۲۰]. پس از نمونه‌برداری و انجام آزمایش XRF<sup>۱۰</sup> از نمونه‌های سنگ مشاهده شد مقدار عنصر  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  بیش از ۸۰ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد و مقدار اکسید آهن آن بیش از ۲ درصد بوده است، که حتی برای تولید فرآورده‌های نسوز که گزینه کاربردی صنعتی این سنگ‌دانه‌ها است، با تکنولوژی معمول فرآوری مناسب تشخیص داده نشده است [۲۰]. با توجه به ظرفیت معدن و تولید باطله‌های معدنی کاربرد سنگ‌دانه‌های حاصل از عملیات خردایش برای مصارف عمرانی مطرح بوده است، که در این مطالعه تنها بخش درشت‌دانه مصالح آسفالتی از این منابع سنگی باطله تأمین می‌شود. تأمین قسمت ریزدانه با توجه به سختی نسبتاً زیاد سنگ‌دانه در حال حاضر اقتصادی نیست. قسمت ریزدانه و فیلر مورد استفاده در این تحقیق، مصالح سنگی آهکی می‌باشد که از معدن کارخانه فرش راه یزد تهیه شده است. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. در این پژوهش از مصالح سیلیمانیتی و آهکی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه شکل ۱ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. همچنین از سنگ‌دانه‌های سیلیمانیتی به‌عنوان درشت‌دانه (مانده روی الک شماره ۴ و ۱/۲ اینچ) برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده شده است (شکل ۲). دلیل انتخاب درشت‌دانه، بزرگ بودن ابعاد سنگ‌دانه‌های سیلیمانیت باطله در دسترس و هزینه زیاد برای خرد کردن سنگ‌دانه در مقیاس آزمایشگاهی و اجرایی می‌باشد. به‌علاوه، یکی از اهداف کاربردی این تحقیق، بررسی امکان استفاده از این نوع سنگ‌دانه جهت تأمین اصطکاک سطحی است که با انتخاب درشت‌دانه از این نوع مصالح سنگی، بافت درشت در سطح تماس رویه آسفالتی را نیز فراهم آورد.

### ۳-۲- قیر

<sup>10</sup>- X-Ray Fluorescence

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی سلیمانیت مورد استفاده

مقدار	روش آزمایش	ویژگی	مصالح
≤۰/۵	ASTM C127	درصد جذب آب (٪)	درشت‌دانه (سلیمانیت)
≤۱۵	ASTM C131	سایش به روش لس آنجلس (٪)	
۱۰۰	ASTM D5821	درصد شکستگی در یک وجه (٪)	
۱۰۰	ASTM D5821	درصد شکستگی در دو وجه (٪)	
۴۸/۷۴	ASTM D2938	مقاومت فشاری (Mpa)	
۲/۷۶	ASTM C29	وزن مخصوص (T/m <sup>3</sup> )	
۷/۰	ASTM D421	سختی (Mohs)	
۰/۲۱	ASTM D5607	چسبندگی (Mpa)	
۴/۵۱	ASTM D3967	زبری	
۲/۶۹	ASTM C128	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	
۱/۲۰	ASTM C128	درصد جذب آب (٪)	فیلر
۲/۷۴	ASTM C188	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	
۲/۶۰	ASTM C128	درصد جذب آب	



شکل ۱- نمودار حدود دانه‌بندی شماره ۴ و محدوده دانه‌بندی درشت‌دانه جایگزین شده با سلیمانیت جایگزین شده



شکل ۲- تصویر نمونه سنگ‌دانه سلیمانیتی مورد استفاده

و جهت تعیین ضریب برجهندگی از دستگاه UTM-14P مطابق با استاندارد ASTM D 4123-82 استفاده شده است. به علت سنجش عملکرد مصالح در یک دمای معمول، نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه تحت بارگذاری نیمه

پس از تعیین درصد قیر بهینه و محاسبه نسبت مارشال برای درصدهای مختلف قیر نتایج حاصل با نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی مقایسه شد. برای تعیین رفتار مصالح آسفالتی در برابر بارگذاری دینامیکی،

سینوسی ۳۸۰۰ نیوتن با دوره بارگذاری ۲۵۰ میلی‌ثانیه و تعداد بارگذاری ۵ پالس با دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) قرار گرفتند. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و عدم وجود محفظه دمایی،

آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۰ درجه انجام و از سایر دماها صرف‌نظر شد. در ضمن از سه نمونه برای انجام هر آزمایش در درصدهای مختلف قیر استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات قیر مصرفی در روند تحقیق

نوع آزمایش	استاندارد آزمایش	نتیجه	حدود استاندارد
وزن مخصوص در $25^{\circ}\text{C}$ ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ASTM D-70	۱/۰۱۴	۱/۰۵-۰/۹۹۵
درجه نفوذ در $25^{\circ}\text{C}$ ( $\square$ )	ASTM D-5	۶۳	۶۰-۷۰
نقطه نرمی ( $\square$ )	ASTM D-36	۴۹	۳۵-۵۷
کشش در $25^{\circ}\text{C}$ (cm)	ASTM D-113	۱۴۶	۱۰۰ <sup>+</sup>
کندروانی در $135^{\circ}\text{C}$ (pa.s)	ASTM D-88	۴۱۲	۴۰۰ <sup>+</sup>
نقطه اشتعال ( $\square$ )	ASTM D-92	۳۱۲	۲۳۲ <sup>+</sup>

### ۳-۵- بررسی عملکرد سطحی

یکی از اهداف این مطالعه، کاربرد مصالح سنگی سیلیمانتی با سختی زیاد، برای تأمین مقاومت کافی در برابر سایش در دوره عمر رویه سطحی است. چنانچه سنگ‌دانه مقاومت اولیه لغزشی بالایی داشته باشد، با توجه به اثرگذاری آن در طول دوره عمر پایداری این مقاومت نیز انتظار می‌رود [۲۱]. بنابراین در ادامه این تحقیق از آزمایش آونگ انگلیسی مطابق دستورالعمل‌های استاندارد برای ارزیابی مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی استفاده شد. مقاومت لغزندگی نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی اندازه‌گیری و با نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی مقایسه گردید. این آزمایش در استانداردهای مختلفی تشریح شده است که کامل‌ترین آنها دستورالعمل موسسه تحقیقات راه و حمل و نقل انگلستان TRRL و استاندارد ASTM A303 است. در این تحقیق از استاندارد ASTM A303 استفاده شده است. همچنین مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی مورد آزمایش لغزندگی قرار گرفته تا با آسفالت تولید شده با سنگ آهکی مقایسه گردد. آزمایش لغزندگی براساس استاندارد ASTM A303 بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و میانگین ۵

قرائت متوالی مشروط بر این که بیش از ۳ واحد با هم اختلاف نداشته باشند به‌عنوان  $\text{BPN}^{11}$  ثبت شد.

### ۳-۶- تحلیل عددی

یکی از مباحث اصلی در مهندسی روسازی ارزیابی عملکرد آن تحت بارهای ترافیکی و پیش‌بینی خرابی‌های اصلی می‌باشد. شناخت و محاسبه عکس‌العمل روسازی در طراحی به‌ویژه در طراحی به روش مکانیستیک- تجربی ( $\text{MEPDG}^{12}$ ) الزامی است. در طراحی صحیح روسازی و ارزیابی درست عملکرد آن، پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های الاستیک مخلوط آسفالتی نقش مهمی دارد. یکی از روش‌های پرکاربرد در پیش‌بینی پاسخ‌های روسازی‌های آسفالتی، روش المان محدود است که به‌طور گسترده توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲]. استفاده از نرم‌افزارهای خاص با کاربردهای ویژه جهت بررسی میزان خرابی‌های بارگذاری‌های مختلف، امری رایج در تحقیقات می‌باشد [۲۲]. نرم‌افزار انتخابی در این مطالعه مورد تأیید روش طراحی مکانیستیک- تجربی اداره راه‌و ترابری ایالت واشنگتن با عنوان

<sup>11</sup>- British Pendulum

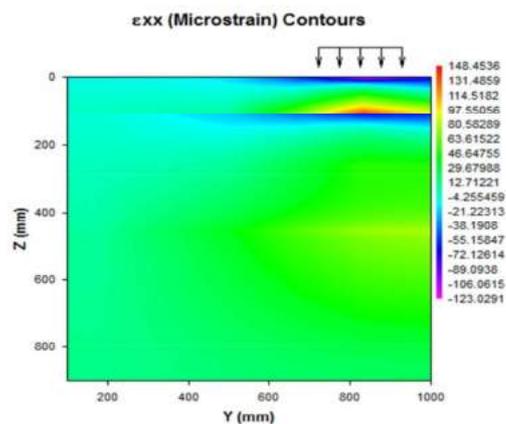
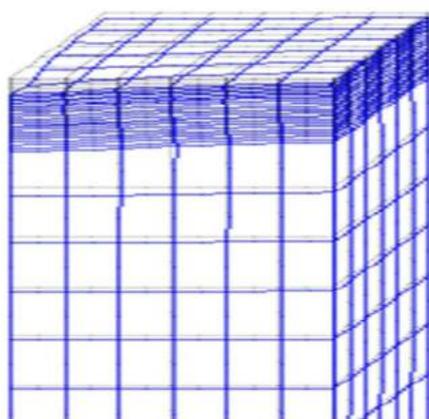
<sup>12</sup>- Mechanistic Empirical Pavement Design Guide

[۲۲] استفاده شد. مدل‌سازی با توجه به تغییر مشخصات لایه رویه آسفالتی با تغییر در نوع مصالح سنگی، به منظور بررسی تغییرات کرنش کششی انتهای لایه آسفالتی با تأکید بر اتصال کامل یا عدم اتصال کامل بین لایه آسفالتی و اساس از جنس مخلوط شنی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام شد. مدل سه‌بعدی با توجه به عملکرد بهتر پاسخ آنها که به واقعیت نزدیک‌تر هستند، انتخاب گردید. شرایط مرزی روسازی، شامل تکیه‌گاه گیردار در پایین و در طرفین مدل نیز کاملاً محدود شد. برای مش‌بندی از روش Infinite Elements و المان‌ها از نوع Local Refined Mesh انتخاب شد. نمونه‌ای از شکل هندسی مدل و تغییرشکل به‌وجود آمده در شکل ۳ نمایش داده شده است.

EverStressFE-3D Finite-Element با دسترسی آزاد، است. به‌منظور محاسبه عکس‌العمل‌های روسازی مدل شده، از بارگذاری به‌صورت یک محور ساده ۸/۲ تنی با چرخ زوج با فاصله ۳۴/۵ سانتیمتر با فشار سطح تماس ۶/۹ کیلوگرم بر سانتیمترمربع که در سطح دایره‌ای به شعاع ۱۰/۲ سانتیمتر به سطح روسازی اعمال شده است، استفاده گردید [۲۳]. روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران از چهار لایه رویه آسفالتی، اساس، زیراساس و بستر تشکیل شده‌اند که هرکدام از این لایه‌ها خصوصیات رفتاری و مشخصات ابعادی مخصوص به خود را دارند. در این مطالعه مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح براساس جدول ۳ انتخاب شده است. مدول الاستیسیته لایه رویه از آزمایش مدول برجهندگی انتخاب و برای مابقی پارامترها از مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار و سایر مطالعات

جدول ۳- مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌های روسازی در مدل‌سازی عددی.

نام لایه	ضخامت (cm)	جنس مصالح	مدول الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )	ضریب پواسون	وزن حجمی (kg/cm <sup>3</sup> )
رویه	۱۰	مصالح آهکی	متغیر (۳۴۴۰-۳۴۵۰-۴۱۶۰)	۰/۳۵	متغیر (۲۲۰۵-۲۲۲۵-۲۲۵۵)
		درشت دانه سیلیمانیت	متغیر (۳۳۸۰-۳۵۳۰-۵۲۰۰)		متغیر (۲۲۳۵-۲۳۳۰-۲۳۸۵)
اساس	۱۵	مخلوط شنی	۲۰۰۰	۰/۳۵	۲۰۵۰
زیرساس	۲۰	مخلوط شنی	۱۴۰۰	۰/۴۰	۲۰۵۰
خاک بستر	۳۸۰	خاک نرم	۲۰۰	۰/۴۵	۱۹۷۰



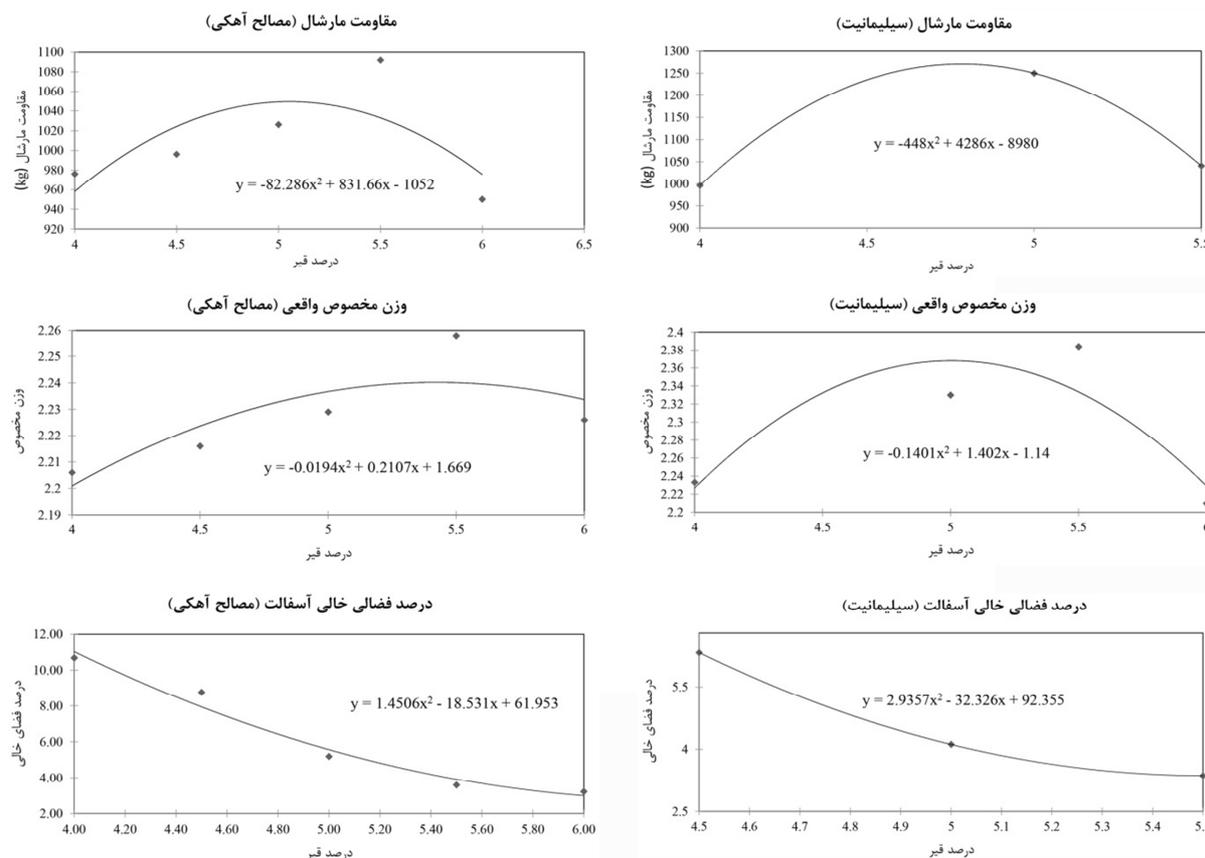
شکل ۳- نمایش مش‌بندی در لایه‌های روسازی و نتیجه کرنش کششی زیرلایه رویه در مدل‌سازی عددی

#### ۴- داده‌ها و تحلیل آنها

در این بخش، ابتدا نتایج آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج تحلیل‌های عددی ارائه می‌شود. در نهایت، نتایج دو روش مطالعاتی به‌صورت خلاصه در قسمت بحث و نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

#### ۴-۱- بررسی عملکرد مقاومتی

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و سیلیمانیتی و انجام آزمایش مارشال، نمودارهای مربوطه ترسیم شد. درصد قیر براساس میانگین سه پارامتر حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت مارشال و درصد فضای خالی ۴٪ به‌دست آمد که نمودارهای مربوط در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- نمودارهای مربوط به تعیین درصد قیر بهینه برای دانه سیلیمانیت نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه

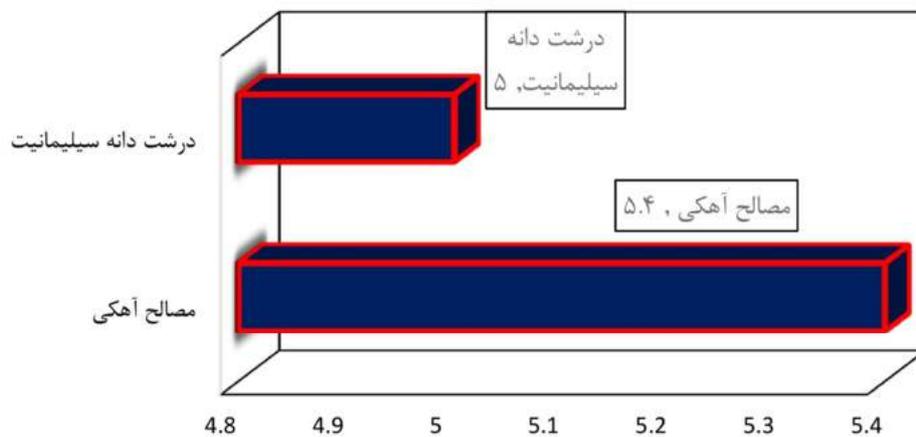
نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۶ مشخص است به ازای درصد‌های مختلف قیر، وزن مخصوص نمونه‌های آسفالتی حاوی مصالح سیلیمانیتی نسبت به حالت آهکی بیشتر بوده و این افزایش وزن مخصوص به دلیل وزن مخصوص بالای سنگ سیلیمانیت نسبت به سنگ آهک می‌باشد.

همان‌گونه که از نمودار شکل ۷ قابل‌مشاهده است، حداکثر مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی تقریباً ۱۵٪ درصد بیشتر از حداکثر

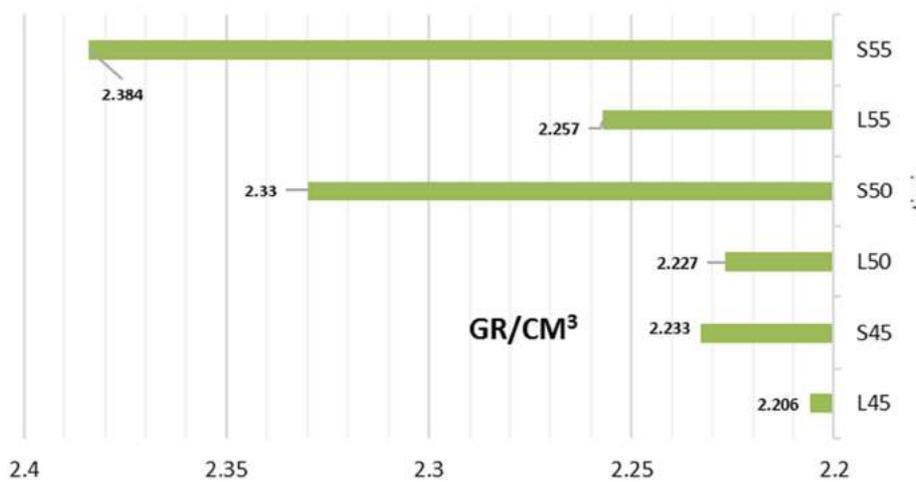
قیر بهینه برای نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی و سیلیمانیتی به ترتیب ۵/۴ و ۵ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که درصد قیر بهینه برای نمونه آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی نسبت به آهکی حدود ۸٪ کمتر است؛ که این تغییرات در شکل ۵ به‌صورت نمودار نشان داده شده است. علت آن را می‌توان در جذب قیر کمتر مصالح سیلیمانیتی بیان کرد. در شکل ۶ و ۷، نتایج وزن مخصوص واقعی، میانگین و نسبت مقاومت مارشال به روانی برای مصالح آهکی و سیلیمانیتی

سیلیمانیتی در درصد قیر ۵ درصد و برای مصالح آهکی در درصد قیر ۵/۵ درصد حاصل شده است.

مقاومت مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی می باشد. مطابق با نمودار، این مقاومت برای مصالح



شکل ۵- نمودار درصد قیر بهینه برای مصالح آهکی و درشت دانه سیلیمانیت



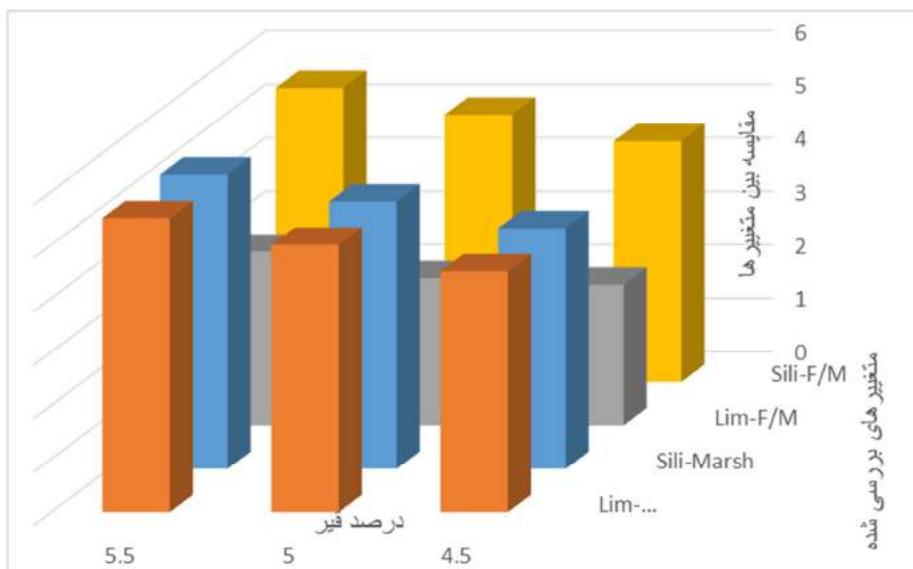
شکل ۶- نمودار تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها (gr/cm<sup>3</sup>) در درصد مختلف قیر

درصد قیر ۵ درصد حدود ۲۵٪ بیشتر از حداکثر مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی حاوی مصالح آهکی می باشد؛ و همچنین در درصد قیر ۵/۵٪ که تقریباً درصد قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی ساخته شده مصالح آهکی می باشد، مدول برجهندگی در مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

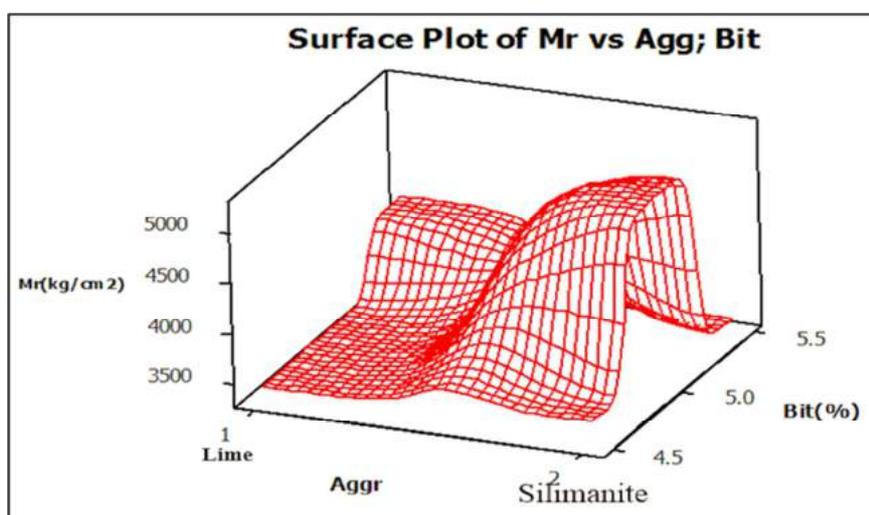
افزایش مدول برجهندگی می تواند باعث کاهش ترک های ناشی از بارگذاری شود. همچنین با توجه به اینکه مدول برجهندگی از پارامترهای مهم طراحی روسازی می باشد، افزایش مدول برجهندگی می تواند سبب کاهش ضخامت لایه آسفالتی و صرفه جویی اقتصادی شود.

نسبت مقاومت مارشال به روانی به عنوان پارامتری برای سنجش عملکرد شیارشدگی مخلوط های آسفالتی می باشد. ملاحظه می شود که این نسبت برای مصالح سیلیمانیتی بیشتر است که بیانگر مقاومت بالاتر این سنگدانه ها برای تحمل بارهای سنگین تر در خطوط کندرو ترافیکی می باشد.

مدول برجهندگی یکی از پارامترهای مهم در طراحی ضخامت رویه آسفالتی می باشد. آزمایش مدول برجهندگی بر روی نمونه های آسفالتی انجام و نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی در



شکل ۷- نمودار تغییرات مقاومت و نسبت مارشال در درصد‌های مختلف قیر و دو نوع سنگدانه



شکل ۸- نمودار تغییرات مدول برجهندگی در مقابل نوع سنگدانه و درصد قیر.

#### ۲-۴- بررسی مقاومت لغزندگی

درشت‌دانه سیلیمانیت به‌علت شیب کمتر نمودار به میزان ۱۵٪، به تغییرات دما وابستگی کمتری دارند. به هر حال، استفاده از مصالح سیلیمانیتی در مخلوط بتن آسفالتی می‌تواند در برابر سایش ناشی از تکرار بارهای ترافیکی در درازمدت به دلیل سختی زیاد مناسب باشد.

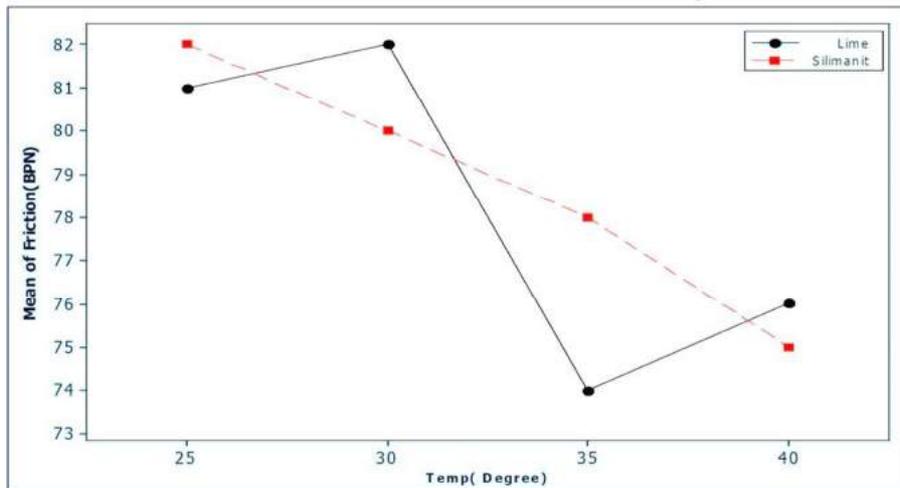
#### ۳-۴- نتایج مدل‌سازی عددی

با توجه به مدل‌سازی انجام شده براساس مشخصات لایه‌های روسازی و اندرکنش لایه‌ها، کرنش بحرانی زیرلایه آسفالت محاسبه شد، که در نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است. هنگامی که، دو لایه رویه و اساس کاملاً با

مقاومت لغزندگی اندازه‌گیری شده با دستگاه آونگ انگلیسی مطابق استاندارد برای مخلوط‌های بتن آسفالتی ساخته‌شده با مصالح آهکی و سیلیمانیتی در ۴ دمای رایج در اغلب فصل‌های سال در کشور در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت لغزندگی برای نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی و سیلیمانیتی در دماهای بالاتر با تغییرات اندکی، عموماً کاهش داشته است؛ که منطبق بر نتایج تحقیقات لئو در مورد اثر عوامل حرارتی بر روی اصطکاک آسفالت است [۲۴]. در عین حال، میزان حساسیت دمایی مصالح سنگی حاوی

اندود پریمکت)، تغییرات قابل توجهی در میزان کرنش کششی در زیر لایه رویه اتفاق نمی‌افتد.

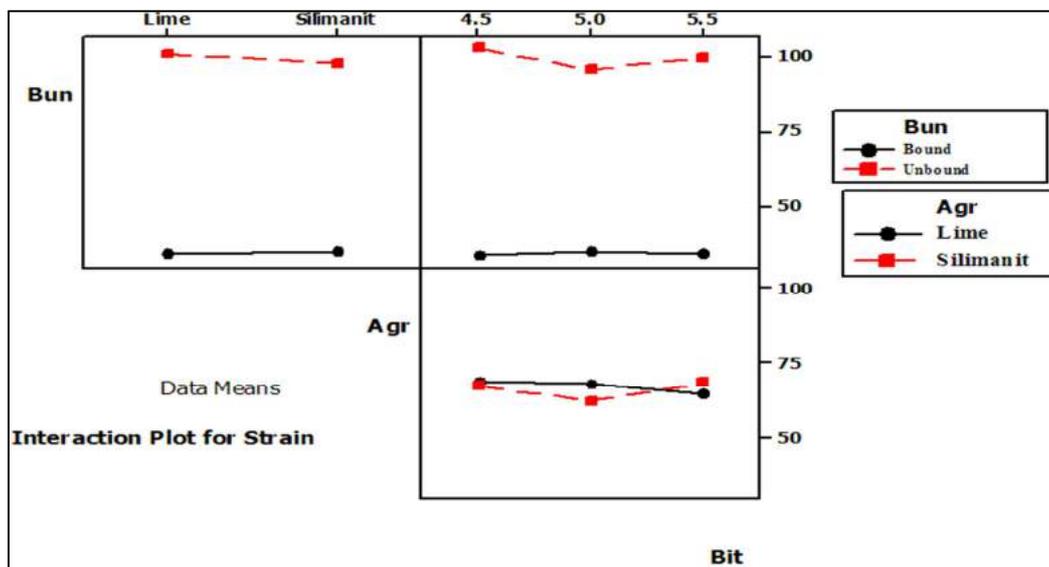
یکدیگر متصل شده باشند، کرنش بحرانی به میزان معنی‌داری کاهش می‌یابد، ولی هنگامی که لایه رویه به لایه اساس متصل نشده باشد (عدم اجرا یا اجرای نامناسب



شکل ۹- نمودار مقاومت لغزندگی دو نوع سنگدانه در دماهای مختلف

بدون قفل وبست با لایه زیرین، مشاهده می‌شود تفاوت معنی‌داری در اثر تغییر درصد قیر بر پاسخ رویه در برابر بارگذاری وجود ندارد. در بررسی جنس سنگدانه‌ها می‌توان مشاهده نمود در اکثر موارد، به‌ویژه در درصد قیر بهینه، در لایه رویه با مخلوط آسفالتی با درشت‌دانه‌ی آهکی، کرنش بحرانی بیشتری در زیر لایه رویه به‌وجود می‌آید.

همچنین در خصوص تغییرات درصد قیر نشان داده می‌شود در لایه‌های کاملاً قفل شده درصد قیر ۵٪، کمترین خطر احتمالی ترک‌خوردگی خستگی به‌علت کاهش کرنش کششی وجود دارد. دلیل این امر، افزایش تماس و اصطکاک بین ذرات با توجه به افزایش تخلخل به علت قیر کمتر در مقایسه با درصد قیر بیشتر در سنگدانه‌های آهکی می‌باشد. در عین حال، در لایه رویه



شکل ۱۰- اثر مستقل جنس سنگدانه، درصد قیر و چسبندگی بین لایه‌های در کرنش کششی زیر لایه رویه در مدل‌سازی عددی

## ۵- بحث و تحلیل نتایج

معنادار بالایی وجود دارد، انطباق دارد. در عین حال، رابطه معناداری بین سختی سنگدانه‌ها و مدول برجهندگی سنگدانه‌ها گزارش نشده است [۲۶]. علت افزایش مقاومت مارشال در نمونه با سنگدانه‌های سخت را به اصطکاک داخلی بین سنگدانه‌ها در برابر گسیختگی ناشی از نیروی برشی بارگذاری مارشال می‌توان منتسب کرد. هرچند این مورد در بارگذاری دینامیکی به علت نیروی وارده کمتر و ادامه نیافتن بارگذاری تا لحظه گسیختگی به این اصطکاک وابستگی کمتری دارد، چراکه نمونه مارشال تا گسیختگی لازم است نیرو را تحمل نماید و مسلماً در حین این بارگذاری درگیری سنگدانه‌ها بیشتر می‌شود؛ درحالی که در رفتار دینامیکی رویه که در آزمایش مدول برجهندگی اندازه‌گیری می‌شود، نیرو محدودتر است و تا حد درگیری سنگدانه‌ها این نیرو ادامه نمی‌یابد.

### ۵-۲- نتایج طرح فاکتوریل متغیرها

این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر جنس سنگدانه درشت‌دانه، بر عملکرد مخلوط آسفالت رویه انجام شده است. اثر همزمان چندین عامل را بر متغیر وابسته در مطالعه طرح فاکتوریل می‌توان در کوتاه‌ترین راه بررسی نمود. بدین منظور و برای همپوشانی اثرات سه متغیر جنس سنگدانه، درصد قیر و چسبندگی بین لایه‌ای به‌طور همزمان، طرح فاکتوریل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج نرخ رشد کرنش کششی در حالت لایه‌های غیرمتصل رویه و اساس مخلوط شنی، در شکل ۱۱، می‌توان نتیجه گرفت نسبت خرابی در درصد‌های قیر کم به زیاد در حالت عدم اتصال دو لایه، به حدود ۰/۷ می‌رسد. در این شکل، متغیرهای مطالعه یعنی درصد قیر (Bit)، اتصال کامل و یا غیرکامل (Bun) و نوع سنگدانه در محور افقی (Agr) و در محور قائم نیز میانگین تأثیرگذاری هریک از متغیرها بر روی کرنش بحرانی کششی (strain) نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای مقایسه شده در تحلیل فاکتوریل، ملاحظه

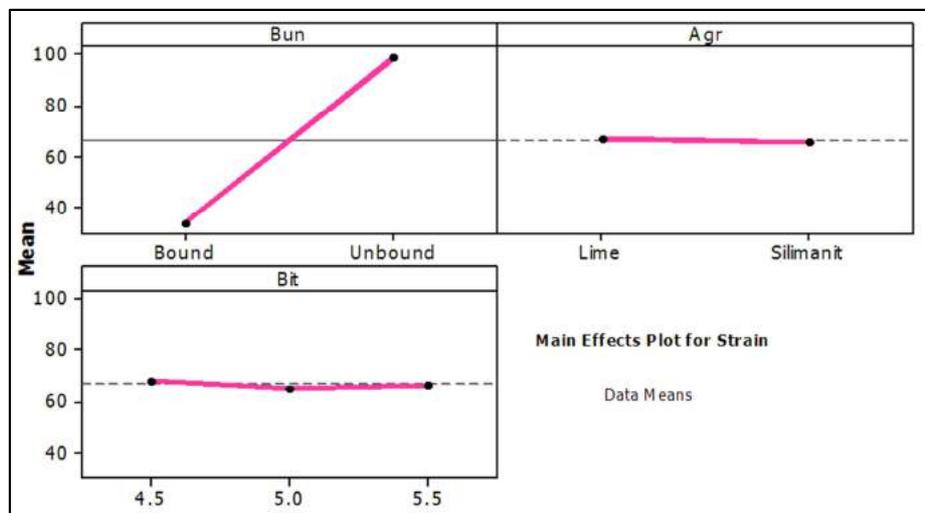
در این بخش، یافته‌های کلی پژوهش بیان شده، بحث در خصوص نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی صورت گرفته و به دلایل احتمالی رفتار مخلوط آسفالتی و مدل روسازی اشاره می‌شود. سعی شده است تا یافته‌های تحقیق حاضر با منابع پیشین و پژوهش‌های مطالعه شده در مورد کاربرد مصالح سنگدانه‌ای با سختی بالا مقایسه شده و در مورد نتایج کلی بحث شود.

### ۵-۱- تأثیر جنس سنگدانه درشت بر نتایج آزمایشگاهی

با توجه به نتایج مشاهده شد استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه سخت سبب مقاومت مخلوط آسفالتی و بهبود اصطکاک سطحی رویه می‌شود. نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی عدد اصطکاک در مطالعه حاضر نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های با سختی بالاتر باعث افزایش عدد مقاومت لغزندگی می‌شود که با نتایج مطالعات انجام شده توسط بلوچیویس و همکاران که در نتایج به افزایش مقاومت لغزندگی سنگدانه‌های گرانیتی (با سختی بالا) برای تأمین اصطکاک مقاوم رویه سطحی مناسب‌تر از سنگدانه‌های آهکی دولومیتی است، که مقاومت آنها در طول زمان نیز کاهش می‌یابد، اشاره می‌کند، انطباق دارد [۲۵]. این رفتار رویه آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های سخت را می‌توان به ایجاد بافت ریز بیشتر در هنگام خرد شدن سنگدانه‌های درشت نسبت داد، چراکه پاندول اصطکاکی نیز بیشتر در اندازه‌گیری اصطکاک، این نوع بافت را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. درخصوص مقاومت مارشال که در بسیاری از آئین‌نامه‌ها هم‌اکنون به‌عنوان مبنای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، نتایج مطالعات حاضر به افزایش مقاومت سنگدانه‌ها، مقاومت مخلوط آسفالتی نیز بهبود می‌یابد، که در مقایسه با نتایج عبدالرحمان و همکاران که نشان می‌دهد، بین سختی سنگدانه‌ها در آزمایش لس‌آنجلس، مقاومت مارشال وابستگی مستقیم در سطح

مخلوط حاوی سنگدانه سلیمانیت به طور معناداری در نتایج تحلیل عددی خرابی رویه آسفالتی مشاهده نشد. دلیل این امر می‌تواند نوع قفل‌شدگی انتخاب شده در مدل نرم‌افزاری و تفاوت آن با شرایط واقعی در آزمایشگاه باشد. در نتایج همچنین کرنش بحرانی در درصد قیر متوسط ۵/۲٪ کمترین مقدار را داراست، که این درصد قیر نزدیک به قیر بهینه در هر دو نوع سنگدانه است. بنابراین در مجموع می‌توان با اجرای مناسب اندودسطحی و استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه سلیمانیت از اثر منفی این معیار خرابی مهم کاست.

می‌شود تأثیر نوع سنگدانه درشت‌دانه کمترین اثر و سپس درصد قیر در مخلوط آسفالتی و در نهایت اتصال لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر کرنش کششی بحرانی دارد. همچنین مشاهده می‌شود، نوع سنگدانه‌ها بر عملکرد ترک‌خوردگی رویه آسفالت رویه به طور معنی‌داری تفاوت زیادی ندارند. هرچند سونگ و همکاران به نقش افزایش چگالی مخلوط آسفالتی و نقش آن در درگیری بین دو لایه و کاهش اثر خرابی به علت کاهش انتقال تنش برشی بین لایه‌ای در یک مطالعه آزمایشگاهی اشاره کرده‌اند [۲۷]، لیکن در این تحقیق اثرگذاری افزایش چگالی مخلوط آسفالتی در



شکل ۱۱- طرح فاکتوریل اثر سه متغیر همزمان جنس سنگدانه، درصد قیر و چسبندگی بین لایه‌ای بر کرنش بحرانی کششی

درصد قیر بهینه برای مصالح آهکی می‌باشد که می‌تواند باعث صرفه اقتصادی شود.

۲- وزن مخصوص مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی در درصدهای مختلف قیر افزایش یافته و مقاومت مارشال مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی نسبت به مصالح آهکی در درصد قیر بهینه ۱۵٪ افزایش داشته است.

۳- مدول برجهندگی مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی ۲۵٪ نسبت به نمونه ساخته شده با مصالح آهکی افزایش یافته است.

## ۶- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله، بررسی و تحلیل اثر استفاده از مصالح سنگی سلیمانیتی به جای مصالح آهکی برای رسیدن به مخلوط بتن آسفالتی با مقاومت بالاتر می‌باشد. پس از تعیین درصد قیر بهینه برای نمونه‌های بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی و آهکی، نمونه‌ها تحت آزمایش مارشال، مدول برجهندگی و آونگ انگلیسی قرار گرفتند و در نهایت با مدل‌سازی عددی عملکرد انواع مخلوط‌های ساخته شده بررسی گردید. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- درصد قیر بهینه برای مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی ۸٪ کمتر از

عملکرد سطحی محدود گردید. استفاده از مصالح سیلیمانیتی برای مخلوط آسفالت درشت‌دانه و همچنین بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط بتن آسفالتی ساخته‌شده با مصالح سیلیمانیتی و همچنین اثر استفاده از این جنس سنگدانه به دلیل پایداری حرارتی بالا می‌تواند برای جلوگیری از ترک‌های حرارتی و برودتی مورد توجه محققان قرار گیرد.

#### ۷- تقدیر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند، از مسئولین معدن میشدوان بافق که با در اختیار قراردادن سنگدانه‌ها و نیز اطلاعات مرتبط با کانی‌شناسی و مشخصات نمونه‌های مصالح با این تحقیق همکاری نمودند سپاسگزاری شود. به ویژه از تلاش‌های جناب مهندس رحیمی که زمینه این همکاری را فراهم آوردند به‌طور ویژه تقدیر می‌گردد.

۴- استفاده از مصالح سیلیمانیتی در مخلوط بتن آسفالتی به دلیل سختی زیاد نسبت به مصالح آهکی می‌تواند باعث افزایش مقاومت رویه آسفالتی در برابر سایش ناشی از عبور بارهای ترافیکی شود.

۵- جنس سنگدانه درشت‌دانه کمترین تأثیر و سپس درصد قیر در مخلوط آسفالتی و در نهایت اتصال لایه‌ها بیشترین اثر را بر کرنش کششی بحرانی دارد.

۶- در تحلیل آماری مشخص شد، کرنش بحرانی در درصد قیر متوسط ۵/۲٪ کمترین مقدار است، که این درصد قیر نزدیک به قیر بهینه در هر دو نوع سنگدانه است.

این مطالعه تنها به جایگزینی بخشی از درشت‌دانه از ضایعات معدنی سیلیمانتی و به بررسی مقاومت و

#### منابع

- [1] Bagampadde, U., Isacson, U., & Kiggundu, B. M. (2006). "Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures", *Materials and structures*, 39(3), 303-315..
- [2] Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). "Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms", *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81-98.
- [3] Vegvesen, S. (2014). Håndbok N200 Vegbygging. *Statens Vegvesen*.
- [4] Brattli, B. (1992). "The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates", *Engineering Geology*, 33(1), 31-44.
- [5] Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014). "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *Materials & Design*, 53, 317-324.
- [6] Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. R., Hamedi, G. H., & Azarhoosh, M. J. (2012). "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 31, 384-388.
- [7] Moghadas Nejad, F. M., Arabani, M., Hamedi, G. H., & Azarhoosh, A. R. (2013). "Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 47, 1523-1527.
- [8] Nålsund, R. & Jensen, V. (2013), "Influence of mineral grain size, grain size distribution and micro-cracks on rocks", mechanical strength, *14th Euro-seminar on Microscopy Applied to Building Materials, Helsingør, Denmark*, 1-10.
- [9] Anastasio, S. (2015), "Evaluation of the effect of aggregate mineralogy on the durability of asphalt pavements", Norwegian University of Science and Technology, dissertation, philosophies doctor, 1-124.
- [10] Chen, Y., Guo, D., & Sha, A. (2013). "Magnetic iron ore using as microwave-absorbing material for de-icing of asphalt pavement", *Min. Res. Dev.*, 33(1), 27-29.
- [11] Li, J., Xu, L. R., & Liu, X. M. (2011). "Research on character of asbestos tailing using as asphalt mixture aggregate", *J. Railway Sci. Eng.*, 5(8), 31-34.
- [12] Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M., & Wan, J. (2015). "Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, 93, 911-918.
- [13] Anastasio, S., Fortes, A. P. P., & Hoff, I. (2017). "Effect of aggregate petrology on the durability of asphalt pavements", *Construction and Building Materials*, 146, 652-657.

- [14] Šernas, O., Vorobjovas, V., Šneideraitienė, L., & Vaitkus, A. (2016). "Evaluation of asphalt mix with dolomite aggregates for wearing layer", *Transportation Research Procedia*, 14, 732-737.
- [15] Oluwasola, E. A., Hainin, M. R., & Aziz, M. M. A. (2015). "Evaluation of rutting potential and skid resistance of hot mix asphalt incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailing r", *Indian J. Eng. Mater. Sci*, 22(5), 550-558.
- [16] Su, N., & Chen, J. S. (2002). "Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass", *Resources, Conservation and Recycling*, 35(4), 259-274.
- [17] Anthony, J.W. (2000). Handbook of mineralogy: Arsenates, phosphates, vanadate. Arsenates, phosphates, vanadates. Vol: 4, Mineral Data Pub.
- [18] Amer, R., & El-Desoky, H. (2017). "A remote sensing method for mapping sillimanite mineralization", *Journal of African Earth Sciences*, 134, 373-382.
- [19] Kohsari, A. H., & Mojtahedzadeh, D. A. Q. H. (2010). "Mineralogy and Formation of Refractory Deposits in Bafgh", *Central Iran, Journal of Mineralogy and Crystallography of Iran*, 2 (18), 255 - 266.
- [20] Shafabakhash. G.A., Naderpour, H., & Motamedi, M. (2018). "Optimal Pavement Response Modeling Using Finite Element Method", *Journal of Modeling Engineering*, 14(47), 33-40.
- [21] Masad, E., Rezaei, A., Chowdhury, A. & Harris, P. (2008). "Predicting Asphalt Mixture Skid Resistance Based On Aggregate Characteristics", *Department of Transportation and the Federal Highway*, FHWA/TX-09/0-5627-1, 266.
- [22] Shafabakhash.G. A., Kashi, A. (2009). "Numerical Study of the Impact of Passenger Aircraft Wheel Characteristics on Damage to Airport Pavement", *Transportation Engineering*, 1(1), 55-67.
- [23] Fakhri, M., Ghanizadeh, A. R. (2012). "Development of a Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements", *Journal of Transportation Engineering*, 2(3), 245-257.
- [24] Yingjian, L. (2003), "Effect of Pavement Temperature on Frictional Properties of Hot-Mix-Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road", Master of Science Thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, January, 1-184.
- [25] Bulevičius, M., Petkevičius, K., Žilionienė, K. & Drozdova, K. (2010), "Testing Of Physical-Mechanical Properties Of Coarse Aggregate, Used For Producing Asphalt Mixtures, And Analysis Of Test Results, Modern Building Materials", *Structures and Techniques 10<sup>th</sup> international conference*, Lative, 1094-1098.
- [26] Abdulrahman, S. & Al-Suhaibani, A. (2015), "Effect of Aggregate Properties on Asphalt Concrete Mixes", *JKAU: Eng. Sci*, 7, 93-110.
- [27] Song, W., Shu, X., Huang, B., & Woods, M. (2018). "Effects of asphalt mixture type on asphalt pavement interlayer shear properties", *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(2), 18-21.



## شبیه‌سازی عددی جریان هوا و انتقال ذرات از سطح پشته‌های انباشت مواد اولیه و مقایسه اثرات تغییر شکل و سرعت بر میزان بادبردگی

ذخیره‌سازی مواد مصرفی یا تولیدی در فضای آزاد و در معرض جریان هوا موضوع مهم و قابل بررسی از نظر مسائل زیست‌محیطی است. همچنین بادبردگی مواد از پشته‌های ذخیره مواد اولیه در صنایع، سبب مشکلات زیست‌محیطی و تبعات اقتصادی می‌شود. مواد مورد نظر به شکل‌های حجمی مختلف که معمولاً هرمی و مخروطی می‌باشند، در محیط اتمسفر انباشته می‌شوند. موضوع مورد بررسی، میزان بادبردگی از سطح پشته و شدت بادبردگی ذرات موجود در سطح آن در اثر جریان هوای آزاد عبوری از روی پشته و نقاط مختلف سطح آن می‌باشد. در این پژوهش، موضوع بادبردگی یا به عبارت دیگر، جابه‌جایی و پخش ذرات موجود از سطح مواد انباشته شده و مقایسه اثرات تغییر شکل پشته در کاهش بادبردگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل این مسأله از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی به کمک روش حجم محدود استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش، مقایسه میزان بادبردگی در قسمت‌های مختلف پشته را به تفکیک در هر حالت مشخص می‌کند. بر مبنای نتایج حاصل، نقاط بحرانی از نظر بادبردگی بر روی پشته در حالت‌های مختلف شناسایی شده است.

**واژگان کلیدی:** نرخ بادبردگی، پشته مخروطی، پشته هرمی، الگوی اویلری-لاگرانژی، دینامیک سیالات محیط‌زیستی.

محمد کاظم مؤیدی\*

استادیار، آزمایشگاه پژوهشی  
توربولانس دینامیک سیالات  
محاسباتی و احتراق، بخش  
مهندسی مکانیک، دانشگاه قم  
پست الکترونیک:

moayyedi@qom.ac.ir

علی بشردوست

دانش‌آموخته کارشناسی  
مهندسی مکانیک، گروه مهندسی  
مکانیک، دانشگاه قم  
پست الکترونیک:

bashardoust69cr7@gmail.com

### ۱- مقدمه

منابع آلاینده در صنعت را می‌توان در قالب دو گروه کانونی و غیرکانونی طبقه‌بندی نمود. منابع کانونی به صورت نقطه‌ای (دودکش) یا خطی (بزرگراه) می‌باشند و منابع غیرکانونی به صورت سطحی بررسی شده و به همین دلیل روش‌های برآورد، مدل انتشار، و کنترل آلودگی آنها پیچیده‌تر می‌باشد. از جمله منابع غیرکانونی می‌توان به

پشته‌های<sup>۱</sup> ذخیره مواد اولیه که به‌عنوان مواد خام فرآورده‌های پایین‌دستی تلقی می‌شوند، اشاره کرد. اهم مطالعات انجام گرفته در زمینه انتقال مواد سطحی از سطوح شیبدار، عمدتاً مربوط به تپه‌های شن و ماسه<sup>۲</sup> می‌باشد. انتقال ذرات شامل سه مکانیزم متداول می‌باشد: برخاستن<sup>۳</sup> از سطح زمین، پراکندگی اتمسفری<sup>۴</sup> و رسوب مجدد بر روی سطح<sup>۵</sup>. علت اصلی نگرانی، اثرات زیست‌محیطی انتشار گردوغبار که شامل هدررفت مواد اولیه و انرژی، تنزل کیفیت هوا و آسیب به سلامتی انسان

<sup>1</sup>- Piles

<sup>2</sup>- Sand dunes

<sup>3</sup>- Uplift

<sup>4</sup>- Atmospheric dispersion

<sup>5</sup>- Deposition

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۳، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۷.

DOI: 10.22091/cer.2019.4211.1143 شناسه دیجیتال

جهت وزش باد روی آنها پرداخته و در نهایت نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار انسیس CFX را با نتایج آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA<sup>۹</sup>) مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که بسته به جهت وزش باد، مقادیر بالاتر اصطکاک در هر واحد سطح، یافت شده اما با توجه به حجم بالای ذخیره‌سازی در هر مترمربع، تعادل مثبت به پشته نیمه چرخشی است [۹].

از آنجایی که انتشار گازهای گلخانه‌ای از محوطه‌های ذخیره‌سازی، یک مشکل چند متغیره است که باید حل شود؛ در سال ۲۰۰۹، دیگو<sup>۱۰</sup> و همکاران با استفاده از نرم‌افزار انسیس CFX10 به بررسی همزمان دینامیک سیالات محاسباتی جریان باد و انتشار گردوغبار در پشته‌های ذخیره‌سازی روباز پرداختند. آنها شکل پشته را نیمه چرخشی در نظر گرفته و سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف برای پشته ذخیره شده روباز ذغال سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت، رفتار میدان واقعی بررسی شد. نتایج نشان داد ترتیب دو پشته موازی ثابت می‌کند که چگونه هر پشته می‌تواند تأخیر ایجاد کند. بنابراین اگر پشته‌ها عمود بر جهت باد قرار گیرند، انتشار کل کمتر خواهد بود [۱۰]. حصارهای متخلخل می‌تواند باعث کاهش میزان گردوغبار از پشته‌های ذخیره‌سازی در محوطه‌های روباز شود، اما تأثیر حفاظت آنها بستگی به ساختار جریان هوا در اطراف پشته و توزیع تنش برشی در هر سطح دارد. در سال ۲۰۱۴، سونگ<sup>۱۱</sup> و همکاران، به شبیه‌سازی عددی ساختار جریان هوا و انتشار ذرات آلاینده در پشت توری (حصار) متخلخل مورد استفاده برای پناهگاه پشته‌های ذخیره‌سازی روباز پرداختند. آنها شکل پشته را مخروط با سطح صاف در نظر گرفتند. در این مطالعه، میدان جریان با استفاده از مدل آشفتگی k-ε شبیه‌سازی شد. نتایج آنها نشان داد که در تخلخل‌های پایین، جریان تجدیدپذیر بوده که در ناحیه بین حصار و

می‌باشد. عوامل متعددی بر فرآیند بادبردگی از پشته‌ها نظیر چگالی توده مواد ذخیره شده، مساحت در معرض باد، محتوای رطوبت، توزیع اندازه ذرات، شکل پشته و سایر موارد تأثیرگذار است؛ اما مهمترین عوامل انرژی باد و ذرات قابل سایش می‌باشند. اولین مطالعات در مورد بادبردگی در سال ۱۹۴۱، درباره حرکت ذرات ماسه توسط باد انجام شد. این کار یک مطالعه فیزیکی درباره حرکت تکدانه‌ای ذرات ماسه توسط باد بود [۱]. مطالعات دیگری در زمینه اثرات جریان باد محیطی روی انتقال ذراتی همچون ریگ‌های روان توسط لانکاستر<sup>۶</sup>، نیومن<sup>۷</sup> و همکاران و پارسن<sup>۸</sup> و همکاران انجام شده است. این تحقیقات، به خوبی رابطه بین شکل ذرات و برهم‌کنش‌های جریان را مشخص کرده و نشان می‌دهند که پدیده انتقال به‌شدت به ساختار ذره و جریان برگشتی بستگی دارد [۲، ۳ و ۴]. مطالعات دیگری در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ در خصوص تأثیر شکل پشته‌ها در میزان بادبردگی از آنها انجام شده است [۵]. حسونود و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، به بررسی اثر مواد افزودنی بر کاهش بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن با استفاده از تونل باد پرداختند [۶]. در سال ۲۰۱۵ مؤیدی و بشردوست، با استفاده از ترکیب مدل جریان سیال (هوا) و مدل فاز گسسته به شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال ذرات آلاینده حول پشته‌های انباشت مواد اولیه پرداختند [۷]. اشرفی و همکارانش، به برآورد میزان بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن با دو روش دینامیک سیالات محاسباتی و ون‌کارمن پرداختند [۸]. در سال ۲۰۰۷، پژوهشی درخصوص اثر شکل پشته بر روی فرسایش باد با استفاده از الگوی دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی ذرات آلاینده و انتشار آنها انجام شد. همچنین محققان، به مقایسه پشته مخروطی و مخروط مسطح (ناقص) و پشته نیمه چرخشی و اثرات

<sup>9</sup> - Environmental Protection Agency

<sup>10</sup> - Diego

<sup>11</sup> - Song

<sup>6</sup> - Lancaster

<sup>7</sup> - Neuman

<sup>8</sup> - Parson

پشته را به صورت مخروطی در نظر گرفته و به دلیل آنکه ضربه‌های باد، موجب تخریب سطح پشته، پخش ذرات و آلودگی آب دریا می‌شد، در جلوی پشته، یک حصار (توری) قرار دادند. در این پژوهش، تأثیر انواع مختلف حصارها، مانند صاف، منحنی و با شکاف پایین، برای انتشار ذرات به محیط، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پژوهش آنها نشان داد که بهترین نتایج مربوط به حصار صاف با شکاف پایین بوده و می‌توان با استفاده از این حصار انتشار گردو غبار را به میزان ۶۰ درصد کاهش داد [۱۳]. در یکی از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده درباره انتشار ذرات آلاینده روی پشته‌ها، ناگل<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶، به شبیه‌سازی جریان دوفازی اطراف یک پشته استوانه‌ای پرداختند. آنها پشته را به صورت استوانه‌ای در داخل یک حجم کنترل در نظر گرفته و نتایج دو مدل ROULUND و Open Foam را با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$ -SST با یکدیگر مقایسه کردند [۱۴]. در پژوهشی در سال ۲۰۱۵، مدل‌سازی عددی فرآیند برخاستن ذرات گردو غبار از یک پشته صنعتی با هندسه پیچیده انجام شد. در این مقاله، پدیده انتشار ذرات گردو غبار در معادن ذغال‌سنگ و سنگ آهن در بندر کوپر کشور اسلوانی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این پژوهش، به کمک شبیه‌سازی عددی از روش RANS<sup>۱۴</sup> و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی در مدل USEPA برای تعیین عوامل انتشار گردو غبار استفاده گردید. همچنین نتایج نشان داد که قرار دادن موانع متخلخل (حصار) در بین پشته‌ها، در کاهش اثرات باد و انتشار گردو غبار موثر است [۱۵].

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی ساختار جریان هوا در اطراف پشته‌های انباشت مواد اولیه با دو شکل هرمی و مخروطی به همراه

پشته ظاهر شد. همچنین تنش برشی در سمت رو به باد سطح تخت ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش متخلخل افزایش می‌یابد. پیش‌بینی‌های عددی آنها نشان داد که حصار با متخلخل بین ۰/۲ و ۰/۳ مطلوب است. آنها از الگوی دینامیک سیالات محاسباتی برای به دست آوردن میدان سرعت بهره برده و مقادیر بهینه برای کاهش انتشار گردو غبار، ۰/۲ و ۰/۳ بود [۱۱].

از آنجاکه کارخانه‌های فولادی یکپارچه یکی از مهمترین اهداف اروپا برای انتشار گردو غبار است، در طول سال‌ها، بسیاری از سرمایه‌گذاری‌ها و تحقیقات بر روی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای متمرکز شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، محققان به تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از میزان انتشار گردو غبار پشته ایزوله شده در برابر دو پشته نزدیک به هم پرداختند. آنها شکل پشته را به صورت هرم با مقطع مثلثی با دو نیم‌مخروط در دو طرف آن در داخل یک حجم کنترل در نظر گرفتند. پژوهشگران برای انتشار گردو غبار از مدل USEPA استفاده کردند. سپس الگوریتم حل آن را برنامه‌نویسی و داده‌های جریان را توسط این مدل، پیش‌بینی نمودند. همچنین آنها دو پشته را به صورت موازی و با زاویه ۶۰ درجه نسبت به هم قرار داده و با دو فاصله مختلف از یکدیگر، اثر وزش باد را روی پشته‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد زمانی که پشته‌ها از هم دورتر هستند، انتشار گردو غبار از ذخایر بالادست کمی افزایش می‌یابد. برعکس، تحلیل پایین دست ذخایر نشان داد که با افزایش فاصله، انتشار گردو غبار کاهش می‌یابد [۱۲]. به دلیل اهمیت بالای مطالعات انتشار گردو غبار روی پشته‌های ذخیره معدنی روباز، تورنو<sup>۱۲</sup> و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۰، به کمک الگوی دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی کاهش انتشار ذرات برای ذخیره‌سازی روباز پشته‌های معدنی توسط حصارها (توری‌ها) پرداختند. آنها شکل

<sup>13</sup>- Nagel

<sup>14</sup>- Reynolds Average Navier-Stokes

<sup>12</sup>- Torno

داشته ولی مشکلات این روش را به خواص آشفتگی جریان آزاد ورودی ندارد. این مدل رفتار بسیار مناسبی در جدایش جریان و گرادیان فشار معکوس از خود بروز می‌دهد. معادلات مدل  $k-\omega$ -SST در حالت دوبعدی تراکم‌ناپذیر به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)k &= P - \beta^* \omega k + \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega &= \frac{\gamma}{\nu_T} P - \beta \omega^2 + \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ &2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ \mu_t &= \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

معادله‌های بالا در مقایسه با مدل  $k-\omega$  تفاوتی با اهمیت را نشان می‌دهند. در این مدل برای محاسبه  $\varepsilon$  تغییر متغیری به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\varepsilon = C_\mu k \omega = \beta^* \omega k \quad (3)$$

### ۳- مدل انتشار آلاینده‌ها

همانطور که روشن است مسئله مورد بحث در این پژوهش شامل اثرات جریان سیال بر حرکت و در نتیجه غلظت ذرات آلاینده، که به صورت ذرات معلق تحت تأثیر تغییرات سرعت و فشار سیال حرکت می‌کنند، می‌باشد. الگوی مورد نظر مبتنی بر یک رویکرد اوپلری- لاگرانژی می‌باشد. لازم به ذکر است فاز گسسته (ذرات معلق) در دستگاه مختصات لاگرانژی و در بستری از فاز پیوسته (با دستگاه مختصات اوپلری) مدل می‌شود. حرکت ذرات به کمک حل معادله تعادل نیروها بر روی یک ذره تخمین زده می‌شود. در واقع این تعادل نیرویی، میان اینرسی ذره، نیروی پسا و بویانسی وارد بر آن و هر نیروی اضافی دیگر می‌تواند به صورت رابطه (۴) نوشته شود [۱۷]:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{a} \quad (4)$$

مدل‌سازی انتشار ذرات آلاینده (گردوغبار) با بهره‌گیری از الگوی دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. همچنین به دلیل عدم تقارن هندسی شکل هرمی، میزان اثرگذاری بخش‌های مختلف سطح پشته بر میزان انتشار ذرات آلاینده و پدیده بادبردگی از سطح آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی، به بررسی جریان و انتشار ذرات جامد ریز مقیاس حاصل از پشته‌های انباشت سنگ آهن پرداخته شده است. بدین منظور، از روش شبیه‌سازی عددی مبتنی بر ترکیب الگوی اوپلری- لاگرانژی برای مطالعه رفتار جریان هوا و انتشار ذرات آلاینده بهره برده شده است. برای مطالعه میدان جریان از دو شکل هندسی متداول برای انباشت سنگ آهن استفاده شده و پیرامون اثرات تغییرات سرعت جریان هوا بر ساختار جریان اطراف پشته‌ها و انتشار ذرات آلاینده در اطراف و پایین پشته بحث شده است.

### ۲- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت خطی بوده که در فرم بی‌بعد به صورت زیر می‌باشد:

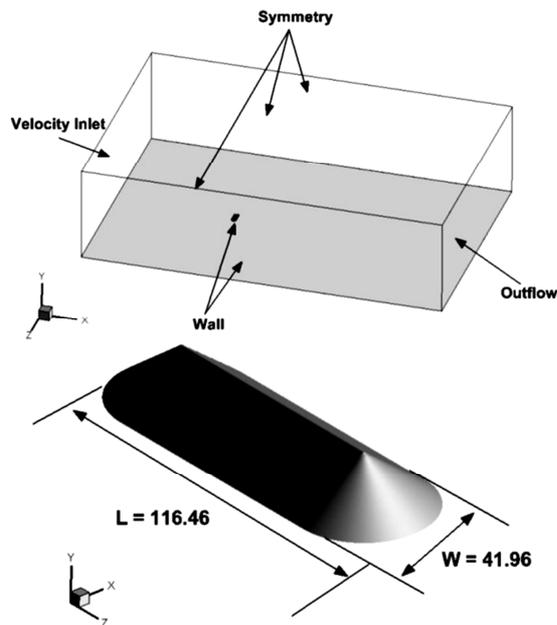
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \frac{D\mathbf{u}}{Dt} &= -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\mathbf{u}$  بردار سرعت،  $p$  فشار و  $\text{Re}$  عدد رینولدز می‌باشد.

### ۲-۱- مدل‌سازی آشفتگی

مدل آشفتگی  $k-\omega$ -SST یک مدل دو معادله‌ای لزجت گردابه‌ای بوده که بسیار متداول است. ویژگی‌های مدل  $k-\omega$  در بخش درونی لایه مرزی باعث می‌شود که این مدل در تمام ناحیه زیر لایه لزج نزدیک دیواره عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد. همچنین مدل  $k-\omega$ -SST می‌تواند به عنوان یک مدل آشفتگی رینولدز پایین بدون هیچگونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار گیرد. این مدل در جریان آزاد، رفتاری شبیه به مدل  $k-\varepsilon$

مرزی منطبق بر فیزیک مسئله و تا حد امکان دقیق خواهد بود. بدین منظور، می‌بایست شرایط مرزی مناسبی برای هندسه در فواصل مناسب علاوه بر خود پشته انتخاب شود. برای حجم کنترل مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی عدی جریان اطراف پشته، از چهار نوع شرط مرزی شامل سرعت ورودی، جریان خروجی، شرط مرزی تقارن و دیواره لزوج، به صورت مشخص شده در شکل ۱، استفاده شده است. برای ورودی (مرز سمت چپ) با در نظر گرفتن فاصله مناسب از جسم از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده شده و برای خروجی (مرز سمت راست) شرط جریان خروجی در نظر گرفته شده است. برای پشته و صفحه‌ای که روی آن قرار گرفته از شرط مرزی عدم لغزش با در نظر گرفتن اثرات زبری متناسب با شرایط واقعی استفاده شده است. برای مرزهای اطراف نیز از شرط مرزی تقارن بهره گرفته شده است.



شکل ۱- شرایط مرزی برای جریان اطراف پشته هرمی و مخروطی و مشخصات هندسی پشته هرمی

## ۵- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از این پژوهش ارائه شده است. بدین منظور از شبیه‌سازی عددی جهت بررسی ویژگی‌های میدان جریان و انتقال ذرات آلاینده استفاده

شده است. شتاب ناشی از هر نیروی اضافی بوده و  $F_D$  نیروی پسا بر واحد جرم ذره است که در آن:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{Re}{24} \quad (5)$$

عدد رینولدز رابطه (۵) به صورت زیر تعریف می‌شود:

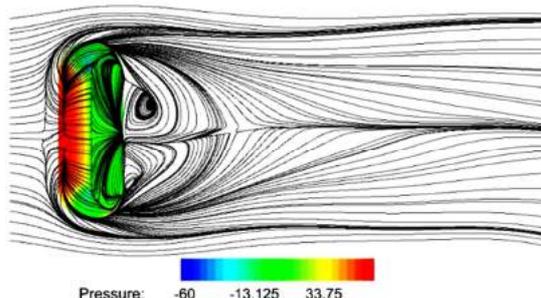
$$Re = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \quad (6)$$

نیروهای اضافی شامل نیروهایی مانند نیروی ناشی از جرم مجازی ذره، نیروی ناشی از حرکت در دستگاه دوار، نیروهای حرارتی، نیروی ناشی از گرادیان فشار، نیروی برونین و نیروی سافمن می‌باشد که هر یک تحت شرایط خاصی اهمیت پیدا می‌کنند. در این پژوهش، صرفاً نیروهای ناشی از گرادیان فشار و متأثر از ادی‌های آشفتگی در نظر گرفته شده است [۱۸].

## ۴- روش حل عددی و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی عددی جریان اطراف پشته از روش حجم محدود با تکیه بر حل معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز استفاده شده است. با توجه به اینکه ماهیت مسئله انتقال ذرات و آلاینده‌ها رفتاری وابسته به زمان دارد؛ بنابراین مدل شبیه‌ساز در حالت ناپایا و برای جریان تراکم‌ناپذیر توسعه یافته است. همانطور که اشاره شده بود به منظور مدل‌سازی اثرات آشفتگی میدان جریان از مدل  $k-\omega$ -SST استفاده شده است. معادلات میدان جریان، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آشفتگی با روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست جداسازی شده‌اند. برای شبیه‌سازی حرکت ذرات آلاینده از روش فاز گسسته با در نظر گرفتن حرکت ذرات جامد متأثر از تغییرات میدان سرعت و با لحاظ کردن اثر نیروی برآ ناشی از تغییر فشار اطراف ذره و اثرات نیروهای مربوط به تغییرات دما استفاده شده است. روشن است به منظور شبیه‌سازی عددی میدان جریان و حرکت ذرات آلاینده، نیاز به حل معادلات حاکم بر دینامیک میدان بوده و حل این معادلات مستلزم بهره‌گیری از شرایط

در پایین‌دست پشته مشخص بوده که همراه با کاهش فشار می‌باشد. برگشت جریان باد از کناره‌های پشته به سمت وسط در پشت، نشان‌دهنده جریان‌های ثانویه‌ای است که با توجه به شکل هندسی و آشفتگی جریان هوا در این قسمت به‌وجود می‌آید. این جریان‌های ثانویه با توجه به ابعاد پشته ممکن است بیش از یکبار رخ دهد.



شکل ۲- خطوط جریان همراه با توزیع فشار نسبی روی سطح پشته هرمی

شکل ۳ (الف)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان را در بازه ۳۵ تا ۵۰ ثانیه روی صفحه‌ای در پایین‌دست پشته و در فاصله ۵۰۰ متری از پشته نمایش می‌دهد. چون قطر ذرات ۱۰ میکرون بوده و این ذرات سبک هستند، در ابتدا حجم زیادی از آنها با وزش باد از روی پشته بلند شده و غلظت آنها افزایش می‌یابد. ولی همانطور که انتظار می‌رود با گذر زمان، نرخ غلظت کاهش یافته ولی مجدداً کمی افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از عبور ذراتی است که از سرعت کمتری برخوردار بوده و در نتیجه دارای زمان ماند بیشتری می‌باشند. در شکل ۳ (ب)، تغییرات غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان روی سطح زمین و در ناحیه اطراف و پایین‌دست پشته آورده شده است. در این نمودار نیز با گذر زمان، نرخ غلظت کاهش یافته تا به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود. مقدار غلظت ثابت شده، نشان‌دهنده میزان ذراتی است که روی سطح زمین انباشته و دچار حالت ایستایی شده‌اند. این مقدار جهت مطالعه پیرامون اثرات زیست‌محیطی ناشی از بادبردگی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

می‌شود. نتایج برای دو الگوی متفاوت و متداول انباشت مواد اولیه ارائه می‌شوند. در مسئله اول، پشته به‌صورت هرمی فرض شده و مدل دیگر، پشته‌ای به شکل مخروط با قاعده دایروی می‌باشد. نتایج حاصل از دو مدل به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های هرکدام با هم مقایسه شده‌اند.

#### ۵-۱- شبیه‌سازی عددی جریان هوا روی پشته هرمی در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

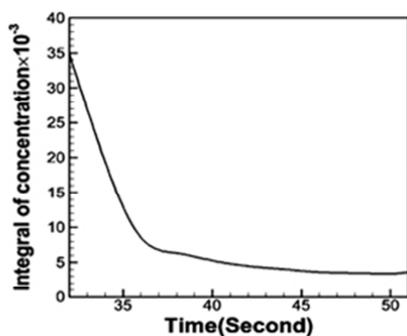
در این بخش به تحلیل جریان اطراف پشته هرمی و انتقال ذرات آلاینده از روی سطح آن پرداخته شده است. در مسائل شبیه‌سازی فاز گسسته، انتخاب شرایط اولیه سهم بسزایی در مسیر حرکت ذرات دارد. با محاسبه دقیق دامنه تغییرات سرعت در نقاط مختلف میدان می‌توان براساس نتایج به‌دست آمده، مسیر موقعیت ذرات و غلظت آلاینده‌ها را در بخش‌های مختلف ناحیه مورد بررسی به‌دست آورد. به‌منظور مدل‌سازی میدان جریان سیال از یک الگوی پایا جهت محاسبه تغییرات سرعت، فشار و غیره در حجم کنترل موردنظر استفاده شده است. پس از همگرایی حل، داده‌های محاسبه شده به‌عنوان مقادیر اولیه جهت شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات و غلظت آلاینده‌ها به‌کار می‌رود. مسئله مورد بحث در این بخش، جریان اطراف یک پشته هرمی شکل می‌باشد.

یکی از شکل‌های متداول در انباشت مواد اولیه در صناعی چون فولادسازی و سیمان، هندسه هرمی می‌باشد. در شکل ۱، مشخصات هندسی پشته هرمی نشان داده شده است. پشته موردنظر شامل ذرات سنگ آهن بوده که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده‌است.

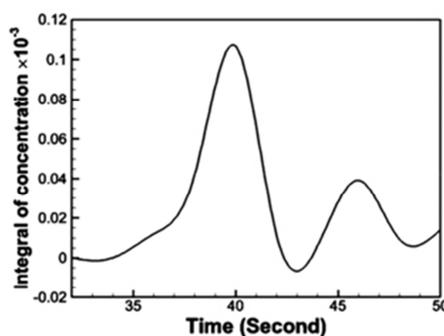
جدول ۱- مشخصات ذرات جامد

جنس ذرات	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	قطر (بر حسب میکرون)
سنگ آهن	۸۰۰۰	۱۰

شکل ۲، خطوط همتراز فشار نسبی روی سطح پشته همراه با خطوط جریان در اطراف پشته را نشان می‌دهد. ناحیه جریان برگشتی در این شکل نیز به وضوح



(ب)

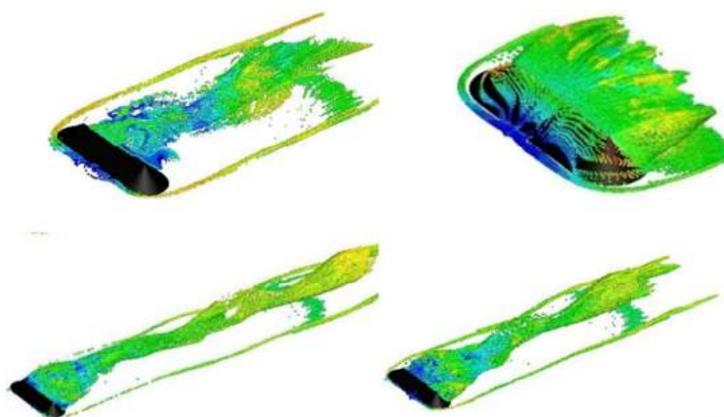


(الف)

شکل ۳- تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده عبوری (الف) از صفحه  $x=50\text{ m}$ ، (ب) روی سطح زمین برحسب زمان (ثانیه) در ناحیه پایین دست پشته هرمی

میدان جریان در پایین دست پشته منتشر می شود. دلیل انتخاب این بازه زمانی برای انتشار منبع ذرات آلاینده می تواند به حالتی تشبیه شود که وزش باد در مدت زمان محدود و سپس جابه جایی ذرات ناشی از آن صورت می گیرد. در ادامه، تنها حرکت ذرات جدا شده از سطح پشته حائز اهمیت بوده و مدت زمانی باقیمانده صرفاً برای دنبال کردن ذرات آلاینده از سطح پشته می باشد.

در شکل ۴، مسیر انتقال ذرات آلاینده در گام های زمانی مختلف نمایش داده شده است. به منظور مدل سازی انتقال آلاینده ها، منبع انتشار گردوغبار روی سطح پشته برای یک بازه زمانی ۳ ثانیه ای در نظر گرفته شده و سپس به مدت ۴۷ ثانیه حرکت ذرات دنبال و شبیه سازی شده اند. همانطور که روشن است با گذر زمان، ذرات بیشتری از سطح پشته جدا شده و با توجه به ساختار

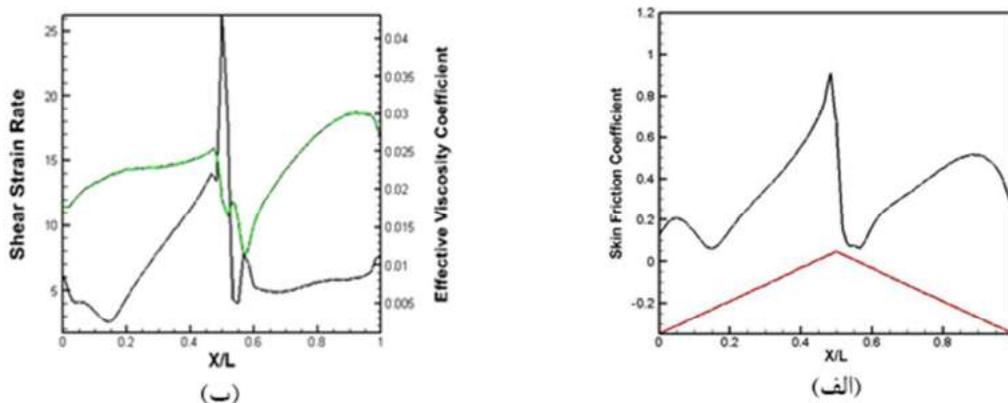


شکل ۴- مسیر انتقال ذرات گردوغبار از روی پشته هرمی در گام های زمانی مختلف، (رنگی شده برحسب مقدار سرعت)

افزایش می یابد. در ناحیه پایین دست پشته به دلیل افزایش سرعت، در اثر جدایش ایجاد شده روی سطح پشته، مقدار ضریب اصطکاک سطحی به واسطه کاهش تنش برشی کاسته می شود. در بخش انتهایی سطح پشته در ناحیه پشت به باد، ضریب اصطکاک دوباره افزوده شده که ناشی از افزایش ضریب لزجت مؤثر متأثر از اثرات آشفتگی جریان می باشد. در این موقعیت، با توجه به نمودار توزیع نرخ کرنش برشی، شکل ۵ (ب)، مقدار آن تقریباً ثابت

در شکل ۵ (الف)، تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برحسب مکان در صفحه  $z=0$  روی پشته هرمی نشان داده شده است. در سطح جلویی پشته به دلیل وجود ناحیه پرفشار ناشی از برخورد جریان هوا بر سطح آن، سرعت در طول پشته به سمت قله آن از یک مقدار کم شروع شده و به یک مقدار افزوده شده خواهد رسید. واضح است که در اثر کاهش سرعت، اثرات ناشی از نیروهای لزج افزوده شده در نتیجه مقدار ضریب اصطکاک سطحی روی سطح پشته

ضریب لزجت موثر جریان می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برحسب مکان (الف) مقایسه نرخ کرنش برشی و ضریب لزجت موثر جریان (ب) در صفحه  $z=0$  روی پشته هرمی

## ۲-۵- شبیه‌سازی عددی جریان هوا روی پشته هرمی در سرعت ۷ متر بر ثانیه

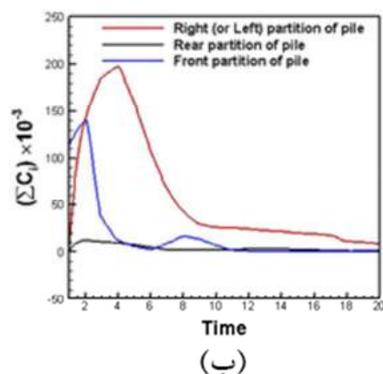
همان‌طور که در این نمودار مشخص است، مجموع غلظت ذرات آلاینده روی این صفحه از دو گوشه راست و چپ پشته در مقایسه با سطوح پشتی و جلویی پشته، مقدار خیلی بیشتری دارد. همچنین از مقایسه این نمودارها با یکدیگر نتیجه می‌شود که میزان بادبردگی، ایجاد نواحی گردبهای و ناحیه و یک به ترتیب از دو گوشه راست و چپ پشته و بعد سطح جلویی و در نهایت سطح پشتی پشته، شکل می‌گیرد. نکته قابل ذکر این است که محور عمودی سمت راست مربوط به تغییرات مقدار غلظت حاصل از دو گوشه سمت راست و چپ پشته می‌باشد. همچنین از مقایسه این نمودارها با یکدیگر دریافت می‌شود که میزان بادبردگی بیشتر، شروع آشفته‌گی‌ها و تشکیل جریان‌های برگشتی به ترتیب از دو گوشه راست و چپ پشته و سپس سطح جلویی و در نهایت سطح پشتی پشته، شکل می‌گیرد.

همچنین با دقت در این شکل نتیجه می‌شود که در ابتدای گام زمانی و تا ۱۲ ثانیه پس از آن، مجموع غلظت ذرات آلاینده ثابت و برابر صفر بوده ولی با گذشت زمان تا ۲۰ ثانیه، با افزایش سرعت، افزایش انرژی جنبشی آشفته‌گی و نیز افزایش بادبردگی در ناحیه پایین دست جریان، مقدار انتگرال سطحی و مجموع غلظت ذرات آلاینده روند افزایشی دارد.

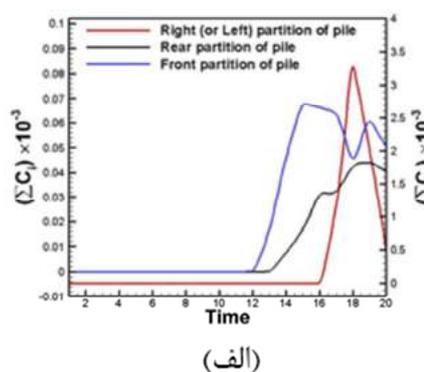
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان هوا اطراف پشته هرمی در سرعت ۷ متر بر ثانیه و انتقال ذرات آلاینده از روی سطح آن ارائه خواهد شد. یکی از اهداف مهم این پژوهش، بررسی چگونگی تأثیر مشخصات هندسی پشته در بخش‌های مختلف آن بر میزان انتشار ذرات آلاینده و اصطلاحاً پدیده بادبردگی می‌باشد. بنابراین، در این بخش یک مدل محاسباتی شامل چهار بخش گوشه‌های سمت راست و چپ پشته هرمی و دو سطح جلویی و پشتی، به‌عنوان منابع مجزای انتشار ذرات آلاینده در نظر گرفته شده است. به‌دلیل ساختار هندسی نامتقارن یک‌پشته هرمی، بررسی اثر تغییرات شکل هندسی هر بخش از آن بر میزان انتشار ذرات آلاینده قابل تأمل می‌باشد. نکته‌ای که در خصوص پشته مخروطی و به واسطه شکل متقارن هندسی آن، چندان اهمیتی ندارد. این موضوع به‌ویژه اگر جریان هوا با زاویه به سطح پشته برخورد کند، برای شکل هرمی بسیار مهم‌تر و دارای تأثیر بیشتری بر پدیده بادبردگی خواهد بود.

در شکل ۶ (الف)، مقایسه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی صفحه  $x=150\text{m}$  در سطح جلویی، پشتی و دو گوشه راست و چپ پشته نشان داده شده است.

با وزش باد به صورت عمود بر سطح جلویی پشته، حجم زیادی از آنها از روی سطح پشته برخاسته و مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین، افزایش می‌یابد. لیکن با گذشت زمان، همانطور که انتظار می‌رود این مقادیر کاهش یافته تا به یک مقدار ثابت همگرا شده یا به عبارت دیگر این ذرات آلاینده دچار حالت ایستایی شده‌اند. این مقادیر ثابت شده برای مطالعه حول مسائل زیست محیطی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

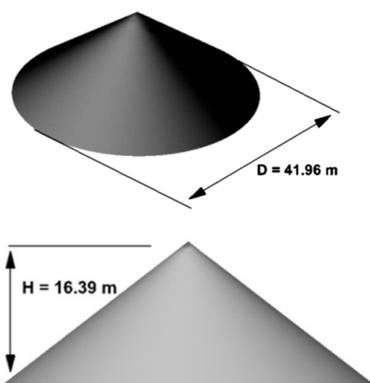


در شکل ۶ (ب)، مقایسه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین در سطح جلویی، پشتی و دو گوشه راست و چپ پشته نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، مقدار غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین از دو گوشه راست و چپ پشته در مقایسه با سطوح پشتی و جلویی پشته، مقدار خیلی بیشتری دارد. همچنین می‌توان گفت که در گام‌های زمانی ابتدایی، به دلیل سبک بودن ذرات آلاینده،



شکل ۶- مقایسه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی صفحه  $X=150$  (الف) و مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین (ب) بر حسب زمان در سطح جلویی، پشتی و دو گوشه راست و چپ پشته

در ناحیه پایین دست پشته (پایین دست جریان)، فشار کاهش یافته و طبق رابطه برنولی، سرعت افزایش یافته و نواحی گردابه‌ای و جریان برگشتی تشکیل شده است.



شکل ۷- مشخصات هندسی پشته مخروطی

از آنجایی که انرژی جنبشی آشفستگی در پشت پشته افزایش یافته و با نرخ اضمحلال آشفستگی نسبت عکس دارد، بنابراین نرخ اضمحلال آشفستگی در پایین دست پشته، کاهش می‌یابد. در شکل ۸ و ۹ توزیع شدت

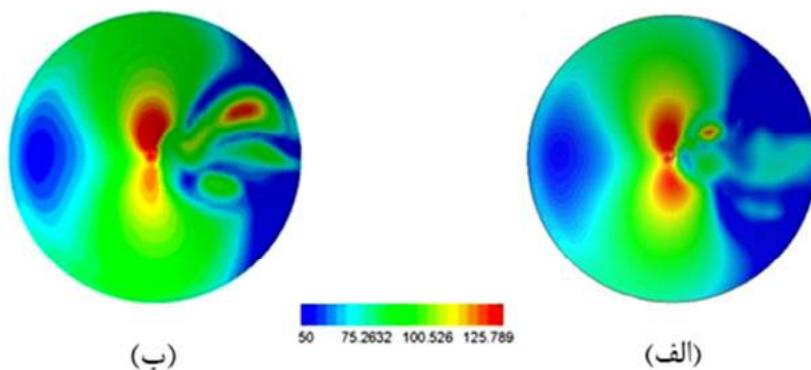
### ۳-۵- شبیه‌سازی عددی جریان روی پشته مخروطی در سرعت‌های ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه

قلمرو محاسباتی موردنظر، یک توده انباشته از سنگ آهن به شکل مخروط بوده که در محیط جابه‌جایی با سرعت متوسط جریان هوا به اندازه ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه قرار دارد. در شکل ۷، مشخصات هندسی پشته مخروطی نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها، مشابه با پشته هرمی، منبع تولید ذرات آلاینده روی سطح پشته، برای یک بازه زمانی ۳ ثانیه‌ای در نظر گرفته شده و سپس به مدت ۹۵ ثانیه حرکت ذرات محاسبه می‌شود.

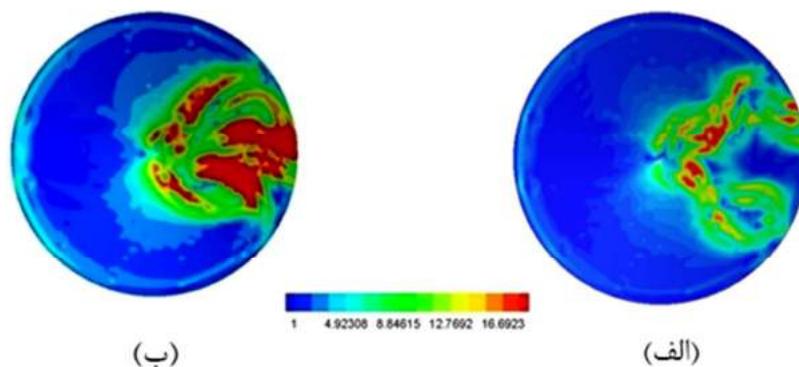
شکل ۸، خطوط هم‌تراز نرخ اضمحلال آشفستگی روی سطح پشته مخروطی را برای دو مقدار سرعت موردنظر نشان می‌دهد. در جلوی پشته، ناحیه سکون ایجاد شده و در نقطه سکون سرعت به صفر رسیده است.

خود اختصاص می‌دهد. افزایش شدت ورتیسیتی محلی معیار مناسبی جهت پیش‌بینی ایجاد لکه‌های آشفته‌گی محلی بوده و در نتیجه احتمال برخاستن و حبس ذرات در این نواحی و تولید توده‌های بزرگ گردوغبار را بیشتر می‌کند.

ورتیسیتی روی سطح پشته‌ مخروطی به ازای سرعت‌های ورودی جریان به ترتیب ۷ متر بر ثانیه و ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. با افزایش سرعت در پشت پشته، شدت ورتیسیتی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش محلی به‌ازای سرعت بالاتر جریان ورودی محدوده بیشتری را به

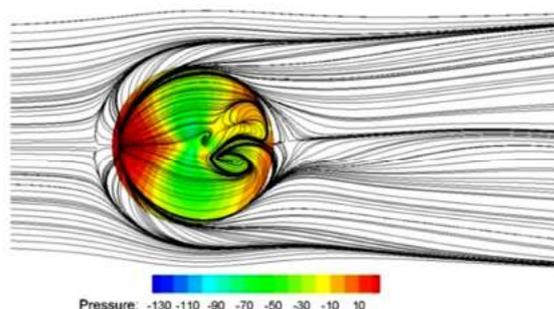


شکل ۸- خطوط همتراز نرخ اضمحلال آشفته‌گی روی سطح پشته‌ مخروطی برای (الف) سرعت ۷ متر بر ثانیه و (ب) ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۹- خطوط همتراز توزیع شدت ورتیسیتی روی سطح پشته‌ مخروطی (الف) سرعت ۷ متر بر ثانیه و (ب) سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در پایین‌دست پشته و در فاصله ۵۰۰ متری از پشته و روی سطح زمین نمایش می‌دهد.

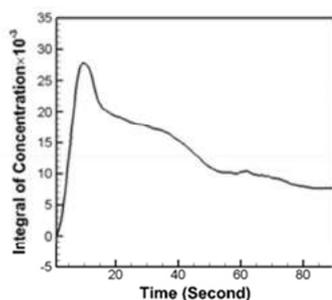


شکل ۱۰- خطوط جریان همراه با توزیع فشار نسبی روی سطح پشته‌ مخروطی در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۱۰، خطوط جریان و توزیع فشار نسبی روی سطح پشته برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در جلوی پشته، فشار افزایش یافته و ناحیه سکون ایجاد شده است. در ناحیه پایین‌دست پشته (پایین دست جریان)، فشار کاهش یافته و براساس قواعد جریان سیال (مانند رابطه برنولی)، سرعت افزایش یافته و نواحی گردابه‌ای و جریان برگشتی تشکیل خواهد شد.

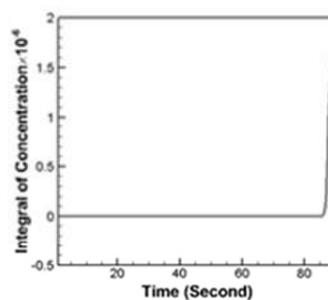
شکل ۱۱ (الف)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان را در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه به‌ازای سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و روی صفحه‌ای

همانطور که انتظار می‌رود با عبور حجم بیشینه اولیه، نرخ غلظت کاهش می‌یابد.



(ب)

به دلیل کمتر بودن مقدار سرعت، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا ذرات از این صفحه عبور نمایند. لذا در گام‌های زمانی انتهایی، غلظت افزایش می‌یابد؛ ولی



(الف)

شکل ۱۱- تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده عبوری برحسب زمان (ثانیه) روی صفحه  $x=5.0 \text{ m}$  (الف) روی سطح زمین (ب) در ناحیه پایین دست پشته مخروطی برای سرعت ۷ متر بر ثانیه

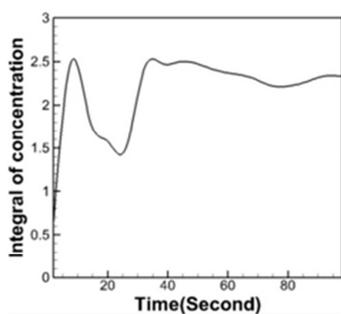
از سرعت کمتری برخوردار بوده و در نتیجه دارای زمان ماند بیشتری می‌باشند. در شکل ۱۲ (ب)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه روی سطح زمین نمایش داده شده است. در این حالت نیز به دلیل قطر بسیار کوچک ذرات، حجم زیادی از آنها با جریان هوا از روی پشته برخاسته‌اند. به واسطه جریان برگشتی در ناحیه پایین دست پشته بخش عمده‌ای از ذرات روی سطح زمین متوقف شده و با گذر زمان به واسطه شدت یافت نواحی جریان با گرادیان‌های شدیدتر سرعت، غلظت آنها روی سطح زمین کاسته شده و به مقدار ثابتی می‌رسد.

در شکل ۱۱ (ب)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان در همان بازه مشابه به حالت (الف) و روی سطح زمین نمایش داده شده است. در این حالت نیز به دلیل قطر بسیار کوچک ذرات، حجم زیادی از آنها با جریان هوا از روی پشته برخاسته‌اند. به واسطه جریان برگشتی در ناحیه پایین دست پشته بخش عمده‌ای از ذرات در این بخش محبوس می‌شوند. در اثر نیروی وزن و کاهش اثرات اختلاف فشار (ناحیه کم فشار پایین دست پشته) به مرور فرود آمده، در نتیجه غلظت آنها افزایش یافته و به مقدار ۲/۵ می‌رسد. لیکن با گذشت زمان، مقدار غلظت کاهش یافته و به عددی در حدود ۱/۵ می‌رسد. این مقدار تجمع ذرات آلاینده روی سطح (حالت ایستایی) به منظور مطالعه اثرات زیست محیطی و اقتصادی پدیده بادبردگی حائز اهمیت می‌باشد. شکل ۱۳ (الف)، تغییرات زمانی مجموع غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان را در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه روی سطح زمین و در ناحیه پایین دست پشته نمایش می‌دهد. در ابتدای گام زمانی و از زمان صفر تا ۱۰ ثانیه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین افزایش یافته و به مقدار ۲/۳ می‌رسد. با گذشت زمان و در

در شکل ۱۱ (ب)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان در همان بازه مشابه به حالت (الف) و روی سطح زمین نمایش داده شده است. در این حالت نیز به دلیل قطر بسیار کوچک ذرات، حجم زیادی از آنها با جریان هوا از روی پشته برخاسته‌اند. به واسطه سرعت کمتر جریان آزاد و جریان برگشتی در ناحیه پایین دست پشته، بخش عمده‌ای از ذرات روی سطح زمین متوقف شده و با گذر زمان به واسطه شدت یافت نواحی جریان با گرادیان‌های شدیدتر سرعت، غلظت آنها روی سطح زمین کاسته شده و به مقدار ثابتی می‌رسد.

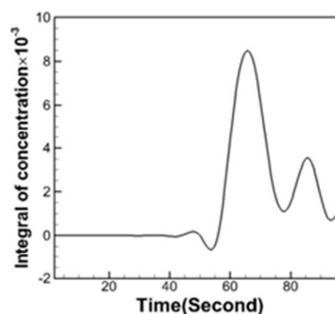
شکل ۱۲ (الف)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان را در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه روی صفحه‌ای در پایین دست پشته و در فاصله ۵۰۰ متری از پشته و روی سطح زمین نمایش می‌دهد. برای این صفحه این نکته قابل بیان است که چون قطر ذرات کم بوده (۱۰ میکرون) و در نتیجه سبک هستند، در ابتدا حجم زیادی از آنها با وزش باد از روی پشته برخاسته و غلظت آنها افزایش می‌یابد. ولی همانطور که انتظار می‌رود با گذر در زمان نرخ غلظت کاهش یافته ولی مجدداً کمی افزوده می‌شود. این افزایش ناشی از عبور ذراتی است که

متری از پشته نشان می‌دهد. در گام‌های زمانی آغازین، مجموع غلظت ذرات آلاینده، مقدار ثابتی داشته ولی با گذشت زمان و از ثانیه ۷۵ تا ۹۸، مجموع غلظت ذرات آلاینده روند افزایشی داشته و این ذرات در ناحیه موردنظر تجمع کرده‌اند.



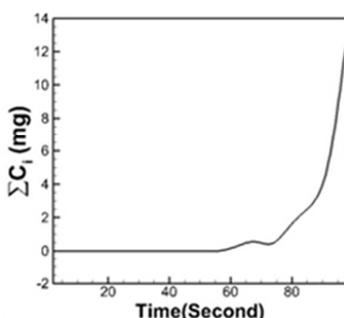
(ب)

بازه ۱۰ تا ۹۸ ثانیه غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین روند کاهشی داشته و به مقدار صفر همگرا شده است. شکل ۱۳ (ب)، تغییرات زمانی مجموع غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان را در همین بازه زمانی روی صفحه‌ای در پایین دست میدان جریان و در فاصله ۵۰۰

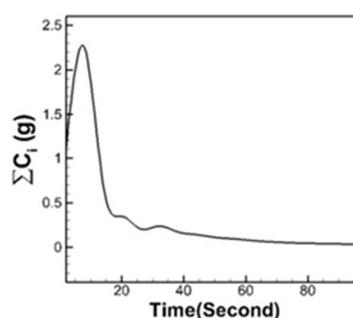


(الف)

شکل ۱۲- تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده عبوری برحسب زمان (ثانیه) روی صفحه  $x=50\text{ m}$  (الف) و روی سطح زمین (ب) در ناحیه پایین دست پشته مخروطی برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



(ب)



(الف)

شکل ۱۳- تغییرات مجموع غلظت ذرات آلاینده عبوری برحسب زمان (ثانیه) روی صفحه  $x=50\text{ m}$  (الف) و روی سطح زمین (ب) در ناحیه پایین دست پشته مخروطی برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۱۵، مقایسه انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان (ثانیه) روی سطح زمین در ناحیه پایین دست برای پشته هرمی و مخروطی در بازه ۳۲ تا ۵۱ ثانیه نشان داده شده است. همانطور که مشخص است برای پشته هرمی، مقدار غلظت ذرات آلاینده انباشته شده در سطح زمین در مقایسه با پشته مخروطی بسیار کاهش یافته است. با دقت در این نمودار، واضح است که پشته هرمی از آنجاکه مقدار غلظت ذرات آلاینده انباشته شده حاصل از آن روی سطح زمین کمتر است؛ مدل مناسب‌تری نسبت به پشته مخروطی جهت

با مقایسه مقدار انتگرال سطحی غلظت روی سطح زمین برای پشته هرمی و مخروطی این نتیجه دریافت می‌شود که مقدار بادبردگی از سطح پشته مخروطی بسیار بیشتر از شکل هرمی بوده و لذا شکل هرمی از لحاظ تأثیرات مخرب زیست‌محیطی، طرح مناسب‌تری برای انباشت مواد اولیه می‌باشد. شکل ۱۴، مسیر انتقال ذرات گردوغبار از روی پشته مخروطی در گام‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. در ابتدای گام زمانی به دلیل سرعت کم، ذرات آلاینده بیشتری در پایین دست پشته وجود دارد. با گذشت زمان و با افزایش سرعت در این ناحیه مقدار غلظت ذرات آلاینده کاهش می‌یابد.

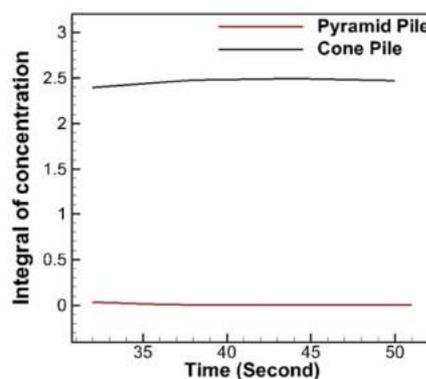
اقتصادی می‌باشد.

انباشت مواد، هم از دیدگاه محیط‌زیستی و هم از دیدگاه



شکل ۱۴- مسیر انتقال ذرات گردوغبار از روی پشته مخروطی در گام‌های زمانی مختلف به ازای سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه، (رنگی شده بر حسب مقدار سرعت محلی ذرات)

در این پژوهش یک پشته هرمی و مخروطی از جنس سنگ آهن با ابعاد واقعی می‌باشد. میدان جریان اطراف پشته با به‌کارگیری معادلات دقیق حرکت سیال از روی پشته و حرکت ذرات آلاینده با بهره‌گیری از معادلات حرکت (قانون دوم نیوتن) شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان‌دهنده این است که سرعت در سطح پشته هرمی و به سمت نواحی جانبی روند افزایشی داشته و بنابراین میزان بادبردگی در این نواحی به مراتب بیشتر از بقیه قسمت‌های پشته خواهد بود. در خصوص پشته مخروطی به دلیل تقارن شکل هندسی میزان بادبردگی در بخش‌های مختلف به میزان شکل هرمی تفاوت ندارد. نتایج و تحلیل‌های به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که چرخش باد، کاهش فشار، افزایش سرعت و افزایش انرژی جنبشی آشفستگی در ناحیه پایین‌دست پشته رخ داده و افزایش فشار و کاهش سرعت در جلوی پشته اتفاق می‌افتد. این موضوع سبب افزایش سهم بادبردگی در نواحی رو به باد و در قسمت‌های جانبی آن شده ولی میزان حبس ذرات در ناحیه پایین‌دست پشته بسیار



شکل ۱۵- مقایسه انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان (ثانیه) روی سطح زمین در ناحیه پایین‌دست برای پشته هرمی و مخروطی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به مطالعه و شبیه‌سازی میدان جریان و بادبردگی ذرات آلاینده از روی پشته‌های انباشت مواد اولیه و مقایسه اثرات تغییرشکل در کاهش بادبردگی پرداخته شده است. تعیین میزان بادبردگی، پخش ذرات و پیشنهاد استفاده از ساختارهای جدید برای پشته‌ها و بهترین و اقتصادی‌ترین روش تثبیت آنها به کمک شبیه‌سازی عددی قابل پیش‌بینی است. مسئله مورد بحث

بیشتر می‌باشد. همچنین شروع چرخش و بیشترین سرعت در گوشه‌های پشته اتفاق افتاده و در ناحیه کاهش می‌یابد. پایین دست پشته با گذشت زمان نرخ غلظت ذرات آلاینده کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen and Co., London.
- [2] Lancaster, N., Nickling, W. G., Neuman, C. M., & Wyatt, V. E. (1996), "Sediment flux and airflow on the stoss slope of a barchan dune", *Geomorphology*, 17(1-3), 55-62.
- [3] Neuman, C. M., Lancaster, N., & Nickling, W. G. (1997), "Relations between dune morphology, air flow, and sediment flux on reversing dunes, Silver Peak, Nevada", *Sedimentology*, 44(6), 1103-1111.
- [4] Parsons, D. R., Wiggs, G. F., Walker, I. J., Ferguson, R. I., & Garvey, B. G. (2004), "Numerical modelling of airflow over an idealised transverse dune", *Environmental Modelling & Software*, 19(2), 153-162.
- [5] Badr, T., & Harion, J. L. (2005), "Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions", *Atmospheric Environment*, 39(30), 5576-5584.
- [6] Torkian, A., Hassanvand, M. S., Sahebnasagh, M. R., Naddaf, K., & Moayyedi, M. K. (2012), "Experimental investigation of the effectiveness of various additives in reducing wind erosion from iron ore piles", *Iranian Journal of Health and Environment*, 5(3), 387-398.
- [7] Moayyedi, M. K., & Bashardoust, A. (2015), "Numerical Simulation of the Flow Field and Motion of Pollutant Particles Around the Raw Materials Piles", 23<sup>th</sup> *International ISME Conference*, Amirkabir University of Technology.
- [8] Ashrafi, Kh., Kalhor, M., Shafie pour, M., & Torkian, A. (2013), "Estimation of Winding rate from Iron Ore Stones Using Computational Fluid Dynamics and Von Karmen Methods", *Iranian Journal of Geophysics*, 7(4), 170-180.
- [9] Torano, J. A., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J. M., & Pelegry, A. (2007), "Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation", *Applied mathematical modelling*, 31(11), 2487-2502.
- [10] Diego, I., Pelegry, A., Torno, S., Toraño, J., & Menendez, M. (2009), "Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles", *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3197-3207.
- [11] Song, C. F., Peng, L., Cao, J. J., Mu, L., Bai, H. L., & Liu, X. F. (2014), "Numerical simulation of airflow structure and dust emissions behind porous fences used to shelter open storage piles", *Aerosol and Air Quality Research*, 14(6), 1584-1592.
- [12] Furieri, B., Russeil, S., Harion, J. L., Santos, J., & Milliez, M. (2012), "Comparative analysis of dust emissions: isolated stockpile vs two nearby stockpiles", *Air Pollution*, 285-294.
- [13] Torno, S., Rodriguez, R., Allende, C., & Toraño, J. (2010), "Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modeling", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 136, 121-128.
- [14] Nagel, T., Chauchat, J., Cheng, Z., Liu, X., Hsu, T. J., Bonamy, C., & Bertrand, O. (2017, December), "Two-phase flow simulation of scour around a cylindrical pile", In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- [15] Novak, L., Bizjan, B., Pražnikar, J., Horvat, B., Orbančić, A., & Širok, B. (2015), "Numerical Modeling of Dust Lifting from a Complex-Geometry Industrial Stockpile", *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 61(11), 621-631.
- [16] Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 172-180). La Canada, CA: DCW industries.
- [17] Mihailovic, D. T. (2010). *Advances in environmental fluid mechanics*. World Scientific.
- [18] Sportisse, B. (2009). *Fundamentals in air pollution: from processes to modelling*. Springer Science & Business Media.

## بررسی عددی جریان و ضریب دبی جریان بر روی سرریزهای نوکاردکی و مایل

در یک عرض مشخص سرریزهای نوکاردکی و مایل دارای طول مؤثر بیش تری می باشند که این مسئله می تواند بر ضریب دبی و راندمان این نوع سرریزها تأثیرگذار باشد. در این تحقیق، تلاش شد تا نقش برخی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی سرریزهای ذکر شده و ارتفاع آنها بر روی ضریب دبی جریان در داخل کانال با استفاده از مدل عددی فلوئنت مورد بررسی قرار گیرد و نتایج حاصل از این مدل با نتایج مدل Flow-3D و اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شود. فشار، سرعت و سطح آزاد جریان با استفاده از مدل آشفتگی k-ε RNG و مدل چند فازی (VOF) با حل عددی تعیین گردیدند. معیار نرمال میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) مدل فلوئنت در شبیه سازی ضریب دبی جریان ۰/۰۵۶۵ به دست آمد که نشان دهنده دقت بالای این مدل می باشد. بررسی نتایج حاصله نشان می دهد که در هر دو سرریز، ضریب دبی با افزایش انرژی بالادست سرریز ( $H_d$ )، کاهش می یابد. حداکثر مقدار ضریب دبی در محدوده  $0.35 \leq (H_d/P)$  در هر دو سرریز نوکاردکی و مایل مشاهده شد. نتایج حاکی از آن بود که سرریزهای مایل در مقایسه با سرریزهای نوکاردکی دارای ضریب دبی بیشتری بوده (۰/۵) برابر ضریب دبی سرریزهای نوکاردکی) و در نتیجه از ظرفیت دبی عبوری (افزایش ۳۳ درصدی) بالاتری نسبت به سرریزهای نوکاردکی برخوردار می باشند.

**واژگان کلیدی:** ضریب دبی، سرریز نوکاردکی، سرریز مایل، جزء حجم سیال، مدل آشفتگی.

سمیه امامی

دانشجوی دکتری سازه های آبی،  
دانشکده کشاورزی، دانشگاه  
تبریز.

پست الکترونیک:

somayhemami70@gmail.com

**جواد پارسا\***

استادیار سازه های آبی، دانشکده  
کشاورزی، دانشگاه تبریز.

پست الکترونیک:

jparsa@tabrizu.ac.ir

### ۱- مقدمه

تاج سرریز با حرکت پرتابی و بدون تماس با صفحه پایین دست ریزش می کند. سرریزهای لبه تیز در شرایط اندازه گیری دبی با دقت بالا کاربرد دارند [۱]. در بین انواع سرریزها، سرریز مثلثی بیشترین دقت را دارا می باشد و معمولاً با زاویه رأس ۹۰ درجه ساخته می شوند. در دبی های نسبتاً بالا معمولاً از سرریزهای مستطیلی استفاده می شود. همچنین سرریزهای دایره ای بهترین مقطع هیدرولیکی را در بین انواع سرریزها دارند [۲]. همانطور که اشاره شد سرریزها علاوه بر اندازه گیری جریان برای کنترل سطح آب در بالادست برای آبیگری از کانالها نیز مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین در صورت طراحی و در نتیجه عملکرد ضعیف سرریز در زمان های سیلابی در قسمت بالادست سرریز، سطح آب تغییرات قابل ملاحظه ای

سرریزها سازه های هیدرولیکی هستند که برای اندازه گیری دبی جریان و کنترل سطح آب در کانال های آبیاری مورد استفاده قرار می گیرند. افزایش دقت اندازه گیری و همچنین سهولت بهره برداری در شرایط مختلف، سبب تنوع طراحی سرریزها شده است. در سرریزهای موسوم به سرریز لبه تیز طول تاج در امتداد جریان، کمتر یا مساوی دو میلی متر بوده و جریان از روی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۱/۲۸، بازنگری ۱۳۹۸/۰۶/۰۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۱۰.  
(DOI): 10.22091/cer.2019.4259.1144 شناسه دیجیتال

هندسی سرریز لبه‌تیز نوکاردکی بر روی ضریب دبی جریان با متغیرهای ارتفاع سرریز، زاویه دیواره سرریز با محور مقطع کانال، انرژی کل بالای سرریز و دبی، نشان داد در این سرریزها با افزایش انرژی کل بالای سرریز و در نتیجه افزایش دبی، ضریب دبی کاهش بیشتری نسبت به سرریز مستطیلی ساده دارد [۵].

بررسی الگوی جریان بر روی سرریز نوکاردکی توسط مدل عددی Flow-3D و به صورت سه‌بعدی نشان داد که مقادیر آزمایشگاهی و استخراج از مدل ریاضی، دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند [۶]. شبیه‌سازی سه‌بعدی پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای منقاری با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت<sup>۳</sup> حاکی از آن بود که در کلیه سرریزهای منقاری با زاویه‌های رأس مختلف، ضریب دبی با افزایش H/P (نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز) افزایش یافته و سپس به دلیل تداخل تیغه‌های ریزشی، ضریب دبی کاهش می‌یابد [۷]. محققان در سال ۲۰۱۶، اقدام به بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهایی با مقطع افقی مثلثی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D نموده و نتایج حاصل را با نتایج سرریز خطی مقایسه کردند. ملاحظه گردید که با افزایش زاویه رأس سرریز از ۳۰ درجه تا ۱۸۰ درجه، به علت کاهش تداخل جریان عبوری با تیغه‌های ریزشی جانبی، اغتشاشات و گردابه‌های جریان کمتر شده و از برآمدگی سطح جریان در نیمرخ طولی و اختلاف عرضی جریان در نیمرخ عرضی کاسته می‌شود [۸]. طول دماغه و زاویه دیواره سرریز با امتداد جریان بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای به روش CFD حاکی از آن است که با افزایش میزان زاویه سرریز در امتداد جریان (α)، ضریب دبی افزایش می‌یابد [۹]. تیگی<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۱، آزمایش‌هایی بر روی سرریزهای مایل با زاویه‌های ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و برای سه ارتفاع ۴، ۸

خواهد داشت که باعث اختلال و کاهش دقت آبیگری از کانال در آبیگرهای بالادست می‌شود. از لحاظ مهندسی تغییرات حداقل سطح آب در زمان‌های سیلابی برای قسمت بالادست سرریز مطلوب می‌باشد.

سرریزهای چندوجهی<sup>۱</sup>، به دلیل افزایش طول مؤثر آن در طول ثابتی از دیواره کانال، دارای دبی عبوری ۱/۵ تا ۴/۵ برابر سرریزهای معمولی می‌باشند و طراحان سازه‌های آبی آزادی عمل بیشتری برای طراحی این نوع سرریزها دارند [۳]. سرریزهای نوکاردکی و مایل از جمله سرریزهای چندوجهی می‌باشند و با توجه به طراحی ساده و دارا بودن طول مؤثر بیشتر نسبت به سرریزهای معمول، دبی بیشتری در مقایسه با سرریزهای معمول برای کانال با عرض و ارتفاع مشابه را از خود عبور می‌دهند (شکل ۱).

قابلیت بالای سرریزهای نوکاردکی و مایل در هوادهی جریان، طول مؤثر بیشتر و همچنین کارایی بالایی این سرریزها در بارهای آبی کم، از مزیت‌های اصلی استفاده از این سرریزها می‌باشد.

امروزه نرم‌افزارهای CFD<sup>۲</sup>، برای بررسی شرایط جریان سیالات در بین محققین، جایگاه ویژه‌ای به خود اختصاص داده‌اند. استفاده آسان، هزینه کم و مهم‌تر از همه، سرعت بالای CFD در رسیدن به پاسخ از دلایل گرایش به این روش تحقیقی می‌باشد. روش‌های عددی در مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی دارای مزیت‌های قابل توجهی می‌باشند. با استفاده از روش‌های عددی، امکان بررسی مشخصات جریان در محدوده وسیعی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بدون انجام آزمایش‌هایی با هزینه‌های بالا و در زمان کمتر برای محققین فراهم می‌شود.

در طول سالین اخیر، محققین زیادی برای به‌دست آوردن ضریب دبی سرریزهای چندوجهی تلاش نموده و روابط زیادی را ارائه داده‌اند. بررسی آزمایشگاهی اثر ابعاد

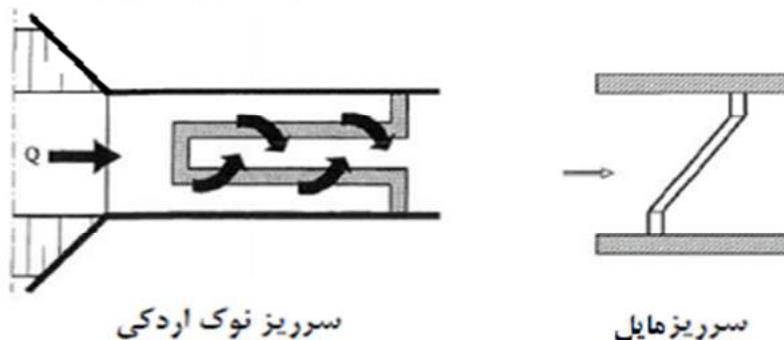
<sup>۳</sup>- Fluent

<sup>۴</sup>- Tingey

<sup>۱</sup>- Labyrinth Weir

<sup>۲</sup>- Computational fluid dynamics

ضریب دبی را برای سرریزهای مایل و در چهار ارتفاع ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر به دست آوردند که نتایج نشان‌دهنده کاهش ضریب دبی با افزایش نسبت H/P می‌باشد و ضریب دبی برای سرریزهای با ارتفاع بیشتر مقدار بالاتری را دارا بوده است [۱۱].



شکل ۱- نمایش سرریزهای مایل و نوک‌اردکی در پلان [۴]

تحقیقات انجام شده روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل نشان می‌دهد که تاکنون شرایط جریان بالادست و ابعاد سرریز بیشتر به صورت آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته است. از آنجاکه هندسه این نوع سرریزها پیچیدگی مسئله را برای مقاصد تئوری و عملی به دنبال خواهد داشت، لذا بررسی هیدرولیک جریان بر روی این سرریزها حائز اهمیت است. به همین منظور، هدف از پژوهش حاضر، بررسی عددی شرایط هیدرولیکی جریان در سرریزهای نوک‌اردکی و مایل است. در این مطالعه، تمام پارامترهای تأثیرگذار بر روی ضریب دبی سرریزهای مذکور، شامل انرژی بالادست سرریز، ارتفاع سرریز و بار آبی روی سرریز با مدل آزمایشگاهی مقایسه و در حالت‌های مختلف بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، از داده‌های ۲۱ مدل سرریز نوک‌اردکی و مایل بر طبق مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته توسط نیک‌پیک و همکاران [۵]، استفاده شده است. این مدل‌ها در ۷ گروه دسته‌بندی شده‌اند. در این پژوهش، ابتدا مدل‌ها توسط نرم‌افزار پیش‌پردازنده

و ۱۲ اینچ انجام داد و رابطه ضریب دبی با ارتفاع انرژی کل بالادست سرریز را به صورت نمودار بیان کرد. نتایج نشان داد در سرریزهای مایل با زاویه ۴۵ درجه و کوچک‌تر از آن، با افزایش مقدار ارتفاع انرژی بالادست سرریز، ضریب دبی کاهش می‌یابد [۱۰]. محققان در سال ۲۰۰۵،

در سال ۲۰۱۵ رضایی و همکاران، به مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی پرداختند. در این پژوهش، رابطه دبی جریان و ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج و برای تعیین ضریب‌های ثابت رابطه‌ها از مدل فیزیکی استفاده شد. نتایج نشان داد رابطه‌ای که از اکثر پارامترهای مؤثر استفاده شده نتایج دقیق‌تری پیش‌بینی می‌کند و برای طراحی قابل پیشنهاد است [۱۲]. پژوهشگران در سال ۲۰۱۲، آزمایشاتی بر روی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با زاویه کناری مختلف انجام دادند. براساس نتایج، ضریب دبی واحد عرض سرریز در ابتدا با افزایش ارتفاع آب به مقدار حداکثر خود می‌رسد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد [۱۳]. آنیس<sup>۵</sup>، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای تک‌سیکله با پلان دوزنقه‌ای را تعیین نمودند. برای نیل به این هدف، ۱۵ مدل مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از زاویه رأس ۲۰ درجه در بین زاویه‌های رأس به کار رفته در سرریزها، بهترین ضریب همبستگی را دارا می‌باشد [۱۴]. بررسی

5- Anis

در این پژوهش، شرایط جریان آب در یک کانال با طول بالادست سرریز ۶ متر و طول کانال پایین دست سرریزهای نوکاردکی و مایل ۶ متر، عرض ۵۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی متر به صورت عددی بررسی شده است. جریان بر روی سرریز نوکاردکی و مایل با استفاده از مدل های فلوئنت و Flow-3D در حالت سه بعدی به روش حجم محدود<sup>۹</sup> شبیه سازی شد. شبیه سازی جریان در سرریزهای نوکاردکی و مایل با حل هم زمان معادلات پیوستگی و مومنتم با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG<sup>۱۰</sup>، روش های بررسی جریان چندفازی (روش حجم سیال<sup>۱۱</sup>)، روش حل عددی حجم محدود، روش گسسته سازی جهت مند مرتبه دوم، برای تحلیل جریان در کنار دیواره از مدل تابع دیواره نامتقارن و تابع دیواره استاندارد و الگوریتم حل هم زمان سرعت و فشار (PISO) انجام شد. معادله حاکم بر جریان سرریزهای نوکاردکی و مایل، معادلات پیوستگی و مومنتم ناویر-استوکس می باشند. معادله پیوستگی رینولدز به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

در این معادله،  $u$  مؤلفه سرعت،  $\rho$  چگالی و  $\dot{u}_j$  تنش رینولدزی می باشد.

جهت مدل سازی آشفتگی، سه مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  حالت Realizable و Standard RNG مورد استفاده قرار گرفت که در نهایت مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  حالت RNG با درصد خطای کمتر (۶/۷٪) و ارائه نتایج دقیق تر جهت مدل سازی انتخاب شد. معادلات حاکم در این مدل به صورت معادلات (۲) و (۳) بیان می شود [۱۵]. در این معادلات،  $\alpha_k$  عکس عدد اغتشاش پرانتل برای  $k$ ،  $\mu_{eff}$  ویسکوزیته گردابه ای مؤثر،  $G_b$  و  $G_k$  عبارت اند از چشمه معادله  $\epsilon$  و  $k$  که به ترتیب اثر شناوری و گرادیان سرعت

گمبیت<sup>۶</sup> ترسیم گردیدند. این نرم افزار، رایج ترین نرم افزار تولید شبکه جریان در CFD می باشد. برای شبکه بندی بازه محاسباتی از المان های مربعی QUAD-MAP استفاده گردید. با توجه به اینکه توصیه می شود در نواحی با گرادیان بالا المان بندی ریزتری به کار برده شود، بنابراین در محل سرریز از شبکه بندی کوچک تر استفاده گردید. برای استقلال داشتن شبکه ها و کنترل عدم تأثیر اندازه سلول ها بر نتایج حاصل از حل عددی، برای تمامی مدل ها از شبکه های یکسان با تعداد تقریبی ۱۹۹۰۶ المان محاسباتی استفاده شد. طرح شبکه بندی یک نمونه سرریز نوکاردکی در شکل ۲، آورده شده است.

در ورودی مدل عددی سرریز از شرط مرزی فشار ورودی (سطح a) استفاده شد. در استفاده از شرط مرزی سرعت ورودی<sup>۷</sup>، دبی ورودی به کانال به صورت ثابت باقی می ماند، اما به دلیل اینکه این شرط مرزی همانند یک روزنه عمل می کند، در ابتدای جریان ورودی انحنا سطح آب به وجود می آورد که این خود بر پروفیل سطح آب بر روی سرریز تأثیرگذار می باشد. به همین دلیل از شرط مرزی فشار ورودی<sup>۸</sup> برای جریان به کانال، با وجود اینکه در دبی ورودی کمی تغییر به وجود می آید، استفاده گردید. فشار ورودی با مشخص بودن عمق ورودی جریان به صورت هیدرواستاتیک تعریف شد (همچنین قابل ذکر است هر دو شرط مرزی ورودی سرعت و فشار مورد آزمایش قرار گرفت که شرط مرزی فشار ورودی بر حسب دقت بهترین شرایط مرزی معرفی و انتخاب شد). فشار خروجی هوا برای سطح آزاد کانال (سطح b)، که مقدار آن نیز صفر می باشد، فشار خروجی صفر برای سطح c، شرط مرزی دیواره (Wall) برای سطح d و شرط مرزی سرعت ورودی جهت هوادهی به سرریز (سطح e) استفاده شد (شکل ۳).

<sup>9</sup> - Finite volume method

<sup>10</sup> - Re-normalization group model

<sup>11</sup> - Volume of fluid (VOF)

<sup>6</sup> - Gambit

<sup>7</sup> - Velocity Inlet

<sup>8</sup> - Pressure Inlet

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3)$$

### ۲-۱- تحلیل ابعادی

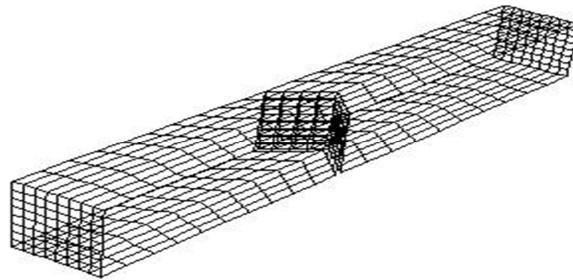
معادله یک‌بعدی جریان بر روی سرریز با فرض جریان آزاد و پرتابی از روی یک سرریز لبه‌تیز ساده به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود [۷]:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L_e H_d^{3/2} \quad (4)$$

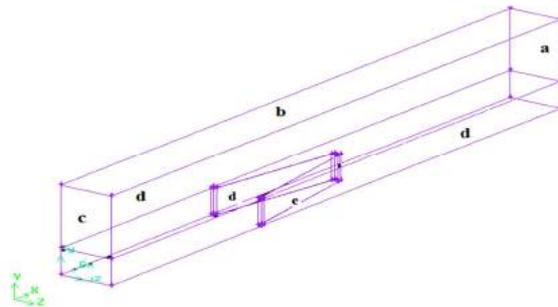
در این رابطه،  $Q$  دبی جریان عبوری،  $C_d$  ضریب دبی جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $H_d$  انرژی کل بالادست لبه سرریز و  $L_e$  طول مؤثر سرریز می‌باشد.

میانگین را در معادله اعمال می‌کنند،  $\rho$  چگالی،  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$ ،  $\varepsilon$  نرخ استهلاک انرژی،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  مقادیر ثابت،  $S_\varepsilon$  ترم اضافی است که در صورت نیاز توسط کاربر تعریف می‌شود،  $C_\mu$  یک مقدار ثابت بدون بعد برابر با  $0.09$ ،  $\eta$  نرخ کرنش متوسط و  $\beta$  ضریب ثابت برابر با  $0.12$  می‌باشند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۲- شبکه‌بندی سرریز در نرم‌افزار گمبیت



شکل ۳- تصویر شماتیک از شرایط مرزی تعریف شده برای هر دو مدل (سرریز نوک اردکی و مایل)

با توجه به شکل ۳ و رابطه (۵)،  $f$  نمایانگر یک تابع،  $y$  عمق آب،  $\alpha$  زاویه سرریز،  $V$  سرعت جریان در بالادست سرریز،  $\mu$  لزوجت دینامیکی سیال،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\rho$  جرم واحد سیال،  $Re$  عدد رینولدز،  $We$  عدد وبر و  $Fr$  عدد فرود جریان می‌باشد. در پژوهش حاضر، جریان در سرریز کانال متلاطم و تأثیر لایه مرزی ناچیز بوده و همچنین با توجه به اینکه حداقل ارتفاع آب روی

تابع جریان در سرریز نوک‌اردکی و مایل براساس خصوصیات هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان به صورت معادله (۵) به دست آمد [۱۱]:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{H_d}{P}, \frac{H_d}{L_e}, \frac{H_d}{W}, \frac{y}{P}, Re, Fr, We, \alpha\right) = 0 \quad (5) \\ C_d = f(H_d, L_e, P, W, \alpha, y, V, g, \mu, \sigma, \rho) \end{aligned}$$

$$f\left(\frac{H_d}{P}, \frac{H_d}{L_e}, \frac{H_d}{W}, \alpha\right) = 0 \quad (۶)$$

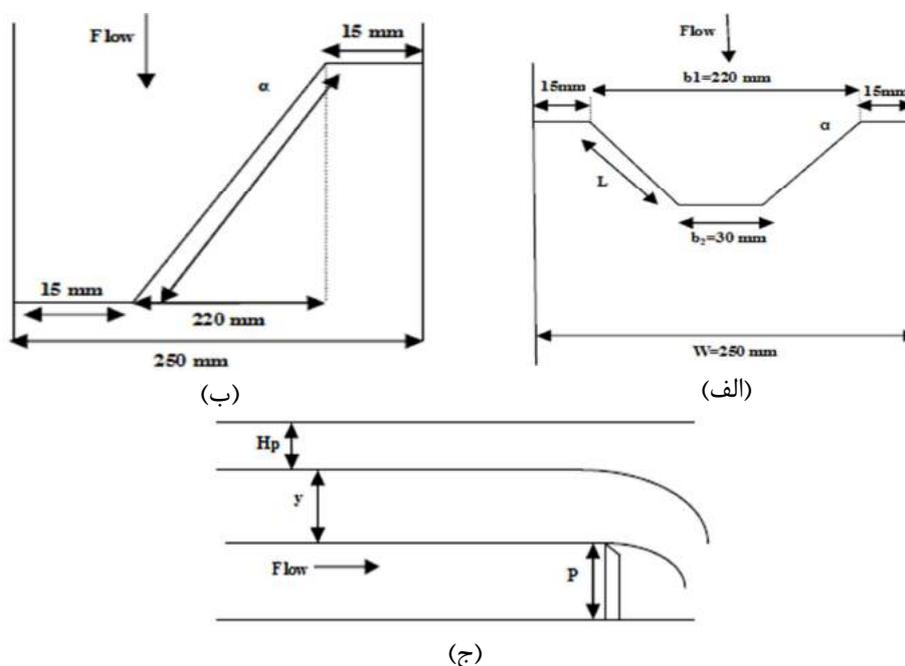
در جدول ۱ و ۲، مشخصات هندسی سرریزهای نوکاردکی و مایل آورده شده است. در شکل ۴ (الف تا ج) نیز، نمایی از سرریزهای نوکاردکی و مایل به همراه مشخصات هندسی مورد استفاده آنها نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای نوکاردکی

ردیف	زاویه ( $\alpha$ )	$L$ (mm)	$Le$ (mm)	$Q$ ( $m^3/s$ )
۱	۴۵	۱۳۴/۳۵	۳۲۸/۷	۷/۶-۵۲
۲	۶۰	۱۹۰	۴۴۰	۷/۶-۶۳
۳	۷۵	۳۶۷	۷۹۴	۱۲/۲-۶۲/۳

جدول ۲- مشخصات هندسی سرریزهای مایل

ردیف	زاویه ( $\alpha$ )	$L$ (mm)	$Le$ (mm)	$Q$ ( $m^3/s$ )
۱	۱۵	۲۲۷/۷۶	۲۵۷/۷۶	۷/۹-۶۱/۲
۲	۳۰	۲۵۴	۲۸۴	۷/۴-۵۸
۳	۴۵	۳۱۱/۱۳	۳۴۱/۱۳	۱۱/۲-۶۴



شکل ۴- نمایی از سرریزها (الف) سرریز نوکاردکی، (ب) سرریز مایل و (ج) مشخصات هیدرولیکی

### ۳- نتایج و بحث

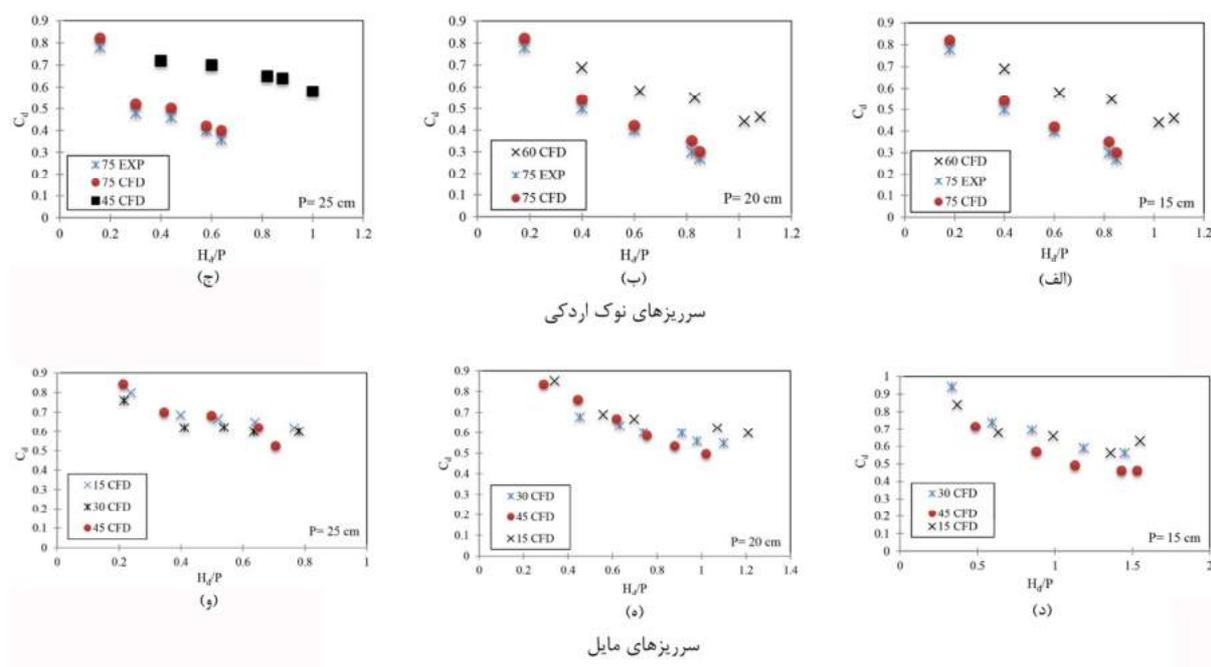
جهت صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار فلوئنت، مدل سرریز مستطیلی هم‌عرض کانال با ارتفاع ۰/۳ متر در کانالی به عرض ۰/۵ متر طراحی و شبیه‌سازی گردید.

#### ۳-۱- صحت‌سنجی مدل فلوئنت

آزمایشات فیزیکی می‌باشد. خطای نسبی مدل فلوئنت، در شبیه‌سازی پارامتر ضریب دبی ( $C_d$ )، بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۸۳ در روش حجم سیال در جریان‌های زیربحرانی نسبت به مدل فیزیکی ثابت می‌باشد و مبنای ارزیابی مدل فلوئنت، مدل آزمایشگاهی است؛ لذا با کاهش مقدار عمق در مدل آزمایشگاهی، خطای برآورد عمق جریان در مدل فلوئنت بیشتر می‌شود. بنابراین همانگونه که در نمودارها نیز مشاهده می‌شود، ضریب دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل فلوئنت، برای تمامی  $H_d/P$ ها، بیشتر از ضریب دبی در مدل فیزیکی است.

سرریز لبه تیز مورد نظر به‌ازای دبی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. بعد از حصول اطمینان از عملکرد نرم‌افزار و روش‌های به‌کار گرفته شده در نرم‌افزار فلوئنت، به طراحی مدل سرریزهای نوک‌اردکی و مایل پرداخته شد.

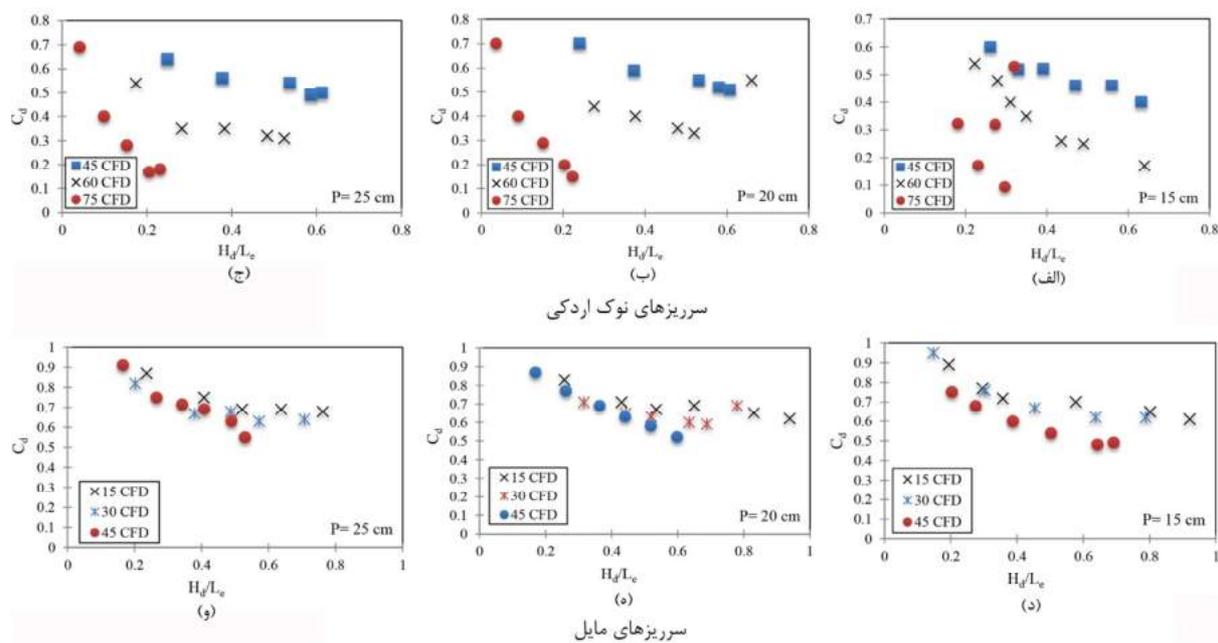
شکل ۵، تغییرات ضریب دبی ( $C_d$ ) در برابر  $H_d/P$  برای ارتفاع‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر را در مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت  $H_d/P$ ، ضریب دبی کاهش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش تداخل جریان در دماغه سرریزها می‌باشد. این نمودار بیانگر تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با مدل فلوئنت و



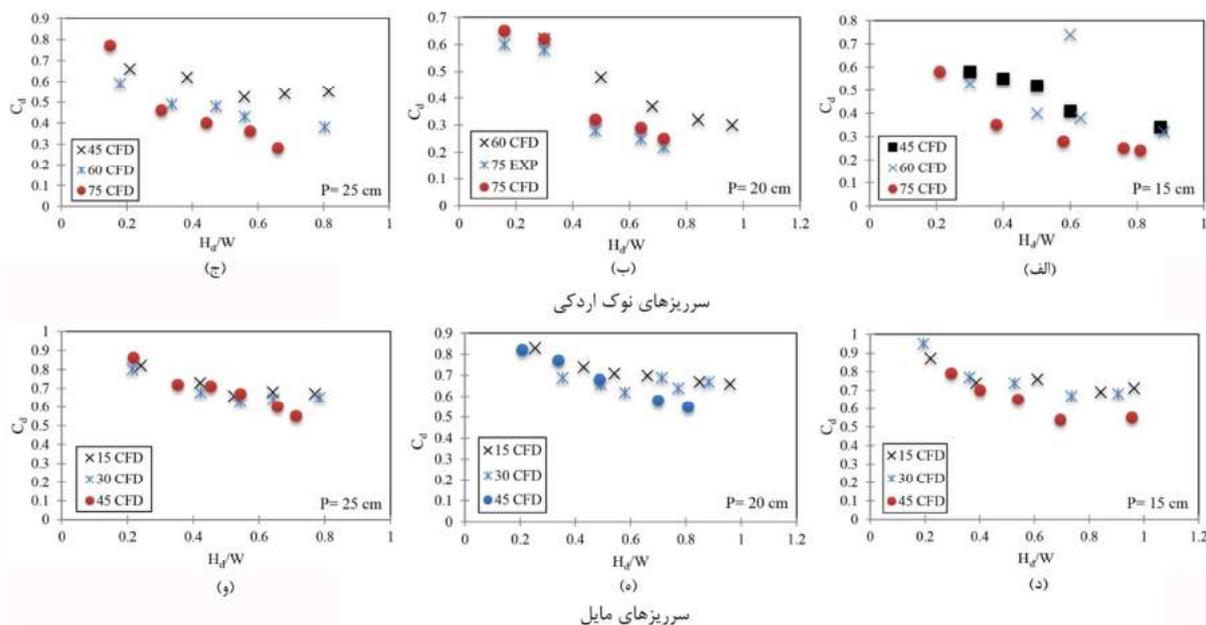
شکل ۵- مقایسه تغییرات ضریب دبی به‌ازای  $H_d/P$ های مختلف بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل فلوئنت

می‌توان نتیجه گرفت که سرریز نوک‌اردکی با زاویه ۷۵ درجه با دارا بودن بیشترین تداخل جریان در دماغه خود، دارای کمترین و سرریز نوک‌اردکی با زاویه ۴۵ درجه دارای بیشترین مقدار ضریب دبی جریان در بین سرریزهای مورد بررسی می‌باشد. در مورد سرریزهای مایل، با کاهش زاویه این سرریزها، ضریب دبی افزایش یافته و به ضریب دبی سرریز استاندارد نزدیک‌تر می‌شود.

تغییرات ضریب دبی در برابر  $H_d/W$  و  $H_d/L_e$  برای زاویه‌های مختلف سرریز نوک‌اردکی و مایل با استفاده از مدل فلوئنت، در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که به‌ازای افزایش نسبت‌های  $H_d/P$ ،  $H_d/W$  و  $H_d/L_e$ ، ضریب دبی کاهش می‌یابد. همان‌طور که گفته شد، کاهش تداخل جریان در دماغه سرریزهای نوک‌اردکی و مایل، سبب این امر می‌شود. همچنین با توجه به نمودارهای اشکال ۶ و ۷،



شکل ۶- مقایسه تغییرات ضریب دبی به‌ازای  $H_d/L_c$  های مختلف بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل فلونت



شکل ۷- مقایسه تغییرات ضریب دبی به‌ازای  $H_d/W$  های مختلف بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل فلونت

در سرریزهای مایل با زاویه ۴۵ درجه و کوچک‌تر از آن با افزایش مقدار ارتفاع انرژی بالادست سرریز، ضریب دبی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل‌های بالا، هرچه انرژی کل بالادست سرریز افزایش یابد، ضریب دبی با شیب بیشتری کاهش می‌یابد.

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ضریب دبی با افزایش نسبت  $H_d/W$  به‌ازای زاویه‌های مختلف سرریزهای نوک‌اردکی و مایل، دارای روند کاهشی (شیب کاهشی) می‌باشد. با توجه به اینکه در کلیه مدل‌های مورد بررسی، عرض کانال ثابت (۰/۲۵ متر) در نظر گرفته شده است، بنابراین مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در روند کاهشی ضریب دبی، پارامتر انرژی کل بالادست سرریزها می‌باشد.

سرریز نوک‌اردکی و در محدوده  $H/P < 0.5$  سرریز مایل برتر است.

نتایج آزمایش‌های محققان نیز نشان داد در سرریزهای مایل با زاویه کوچک‌تر از ۴۵ درجه با افزایش مقدار ارتفاع انرژی بالادست سرریز، ضریب دبی کاهش یافته است و در محدوده  $0.185-0.25$  قرار می‌گیرد [۱۰]. همچنین نیک‌پیک و همکاران، کمترین مقدار ضریب دبی را به ترتیب برای سرریزهای نوک‌اردکی در حدود  $0.3$  و برای سرریزهای مایل با زاویه ۴۵ درجه،  $0.54$  به دست آوردند [۵]. نتایج هر دو مطالعه با نتایج حاصله از پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، هدف اصلی، بررسی هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل با استفاده از مدل عددی فلوئنت و در نهایت مقایسه نتایج حاصله با نرم‌افزار Flow-3D بود. جهت بررسی عددی از روش RNG k-ε برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان و مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان چندفازی استفاده شد. نتایج تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل فیزیکی، مدل فلوئنت و مدل Flow-3D، بیانگر تطابق و برتری مناسب مدل فلوئنت در شبیه‌سازی عددی ضریب دبی بین نتایج بود. بنابراین می‌توان مدل فلوئنت را به دلیل هزینه و زمان کم‌تر و سرعت بالای اجرا در مقایسه با مدل Flow-3D، جایگزین مناسبی برای مدل فیزیکی (مطالعات آزمایشگاهی) معرفی نمود.

۲- خطای نسبی مدل فلوئنت در شبیه‌سازی ضریب دبی در مقایسه با مدل Flow-3D بین  $0.3\%$  تا  $0.8/3\%$  می‌باشد.

۳- ضریب دبی در سرریزهای مایل در مواقعی که ارتفاع آب روی سرریز کم باشد، بیشتر از سرریز

### ۳-۲- مقایسه نتایج مدل فلوئنت و مدل Flow-3D در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل

جهت بررسی کارایی و عملکرد دو مدل فلوئنت و Flow-3D در شبیه‌سازی عددی هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل، در جدول ۳، ریشه میانگین خطای نرمال شده<sup>۱۲</sup> مدل‌های عددی مذکور به‌زای زاویه‌ها و مدل‌های آشفتگی مختلف برای هر دو سرریز مورد مطالعه در تحقیق حاضر ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل فلوئنت (به‌صورت سه‌بعدی) در مقایسه با مدل Flow-3D، اختلاف محسوسی با نتایج آزمایشگاهی (مدل فیزیکی)، نشان نداد و تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از مدل عددی فلوئنت و آزمایش‌های فیزیکی مشاهده شد.

با توجه به آنکه تاکنون مطالعات موثقی در مورد مدل‌سازی عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای نوک‌اردکی و مایل صورت نگرفته است، لذا نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج به‌دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی مراجع [۵]، [۱۰]، [۱۱] و [۱۶]، که مطالعاتی بر روی ضریب دبی سرریزهای مایل و نوک‌اردکی انجام دادند، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مطالعه برقی و همکاران، حاکی از آن بود که در سرریزهای با زاویه ۴۵ درجه و کوچک‌تر از آن، با افزایش نسبت  $H/P$ ، ضریب دبی کاهش یافته و به مقدار  $0.6$  می‌رسد [۱۶]. همچنین نوری و چلمیران، ضریب دبی سرریزهای مایل را در چهار ارتفاع ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ در محدوده  $0.09-0.5$  گزارش کردند [۱۱].

نتایج مقایسه‌ها نشان داد، تفاوت کارایی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل در نسبت‌های متفاوت  $H/P$ ، ناچیز بوده و روند معنی‌داری ندارد. در محدوده  $0.4 < H/P < 0.2$

<sup>12</sup>-Normalized Root Mean Square Error

نوکاردکی (به دلیل تداخل جریان در دماغه سرریز) می‌باشد. همچنین با افزایش بار آبی روی این سرریز، ضریب دبی آن روند کاهشی کمتری در مقایسه با سرریز نوکاردکی می‌یابد.

جدول ۳- NRMSE مدل فلونت و Flow-3D در حالت‌های مختلف

معیار نرمال میانگین مجذور مربعات خطا (NRMSE)		پارامترهای بی‌بعد			زاویه ( $\alpha$ )		مدل به کار رفته
		$H_d/W$	$H_d/L_e$	$H_d/P$	سرریز مایل	سرریز نوک اردکی	
Fluent	Flow-3D						
۰/۰۳۱۴	۰/۰۴۵	۰/۱۸-۱	۰/۰۳-۰/۸	۰/۱۶-۱/۵۳	۱۵-۴۵	۴۵-۷۵	3D, k-ε, RNG, VOF, PISO
۰/۰۱۹۵	۰/۰۲۴۳	۰/۱۸-۱	۰/۰۳-۰/۸	۰/۱۶-۱/۵۳	۱۵-۴۵	۴۵-۷۵	3D, k-ε, RNG, VOF, PISO
۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۱	۰/۱۸-۱	۰/۰۳-۰/۸	۰/۱۶-۱/۵۳	۱۵-۴۵	۴۵-۷۵	3D, k-ε, RNG, VOF, PISO
۰/۰۵۶۱	۰/۰۶۴۲	۰/۱۸-۱	۰/۰۳-۰/۸	۰/۱۶-۱/۵۳	۱۵-۴۵	۴۵-۷۵	3D, k-ε, RNG, VOF, PISO
۰/۰۴۲	۰/۰۵۱	۰/۱۸-۱	۰/۰۳-۰/۸	۰/۱۶-۱/۵۳	۱۵-۴۵	۴۵-۷۵	3D, k-ε, RNG, VOF, PISO

تداخل جریان در دماغه خود، دارای کمترین و سرریزهای نوکاردکی و مایل به ترتیب با زاویه ۴۵ و ۱۵ درجه دارای بیشترین مقدار ضریب دبی جریان در بین سرریزهای مورد بررسی می‌باشد.

۴- در محدوده  $H_d/P < 0/35$  ضریب دبی در هر دو سرریز نوکاردکی و مایل، حداکثر مقدار خود را دارد.

۵- سرریزهای نوکاردکی و مایل به ترتیب با زاویه‌های ۷۵ و ۴۵ درجه با دارا بودن بیشترین

## مراجع

- [1] Bos, M. G. (1988). "Discharge measurement structures", *International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI)*.
- [2] Beyrami, M.K. (2009). "Water Transfer Structures", *Isfahan University of Technology Publications*.
- [3] BeihaghiKondari, A., Zeiae, N. A., khodashenas, R. S., & Zahedi, H. (2012). "Simulation lateral weirs in rectangular canal using Fluent software", *9<sup>th</sup> international civil engineering congress*, 19-21 Ordibehesht, Esfahan University.
- [4] Zahiri, A. (2014). "Extracting the relationship between the discharge coefficient in arc weirs by genetic planning", *Irrigation and drainage*, 9(2), 232-244.
- [5] Nikpeik, P., Kashefipour, S. M., & Mpltaji, A. (2011). "Investigation on the effect of duckbill weir geometry on discharge coefficient", *Chaloos Islamic University Pub. Chaloos, Iran*, 39(1), 1-10.
- [6] Saiedi, M., Shaghaghian, M. R., & Zayeri, M. R. (2014). "Investigation of flow pattern on duckbill weir using Flow-3D Model", *Second national conference on applied research in civil, architecture and urban management*.
- [7] Emami, S. (2016). "Numerical investigation of geometric parameters effect of the duckbill weir on the discharge coefficient", *M.Sc. Thesis of Hydraulic Structures*, Department of Water Engineering, University of Tabriz.
- [8] Haghiaibi, H., Abbaspour, B., Maleki, A., & TorabiPoudeh, H. (2015). "Simulation of flow pattern on horizontal triangular weirs and comparison with linear weirs using Flow-3D model", *Journal of Water Engineering*, 9, 125-137.
- [9] Azhdari-Moghaddam, M., Amanian, N. A., & JafariNadoshan, A. (2011). "Investigation the length and angle of the head of the trapezoid labyrinth weir using CGD", *6<sup>th</sup> national civil engineering congress*, 6-7 May, Semnan University.

- [10] Tingey, S. E. (2011). "Discharge coefficient of oblique weirs", *M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering*, Utah State University, USA, 51 p.
- [11] Noori, B. M. A., & Chilmeran, T. A. H. (2005). "Characteristics of flow over normal and oblique weirs with semicircular crests", *Al-Rafidain Engineering, Journal*, 13(1), 49-61.
- [12] Rezaee, M., Emadi, A., & Aqajani Mazandarani, Q. (2015). "Experimental Study of Rectangular Labyrinth Weir", *Journal of Water and Soil*, 29(6), 1438-1446.
- [13] Khode B. V., Tembhurkar A.R., Porey P. D., & Ingle R. N. (2012). "Experimental studies on flow over labyrinth weir", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 10, (ASCE) IR.21p.
- [14] Anees, K. I., Riyadh, A. I. A., LiyodH, C., Chua, A., & Subrat, D. (2016). "Determination of discharge coefficient for flow over one cycle compound trapezoidal plan form labyrinth weir", *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(4), 314-328.
- [15] Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- [16] Borghei, S. M., Vatannia, Z., Ghodsian, M., & Jalili Ghazizadeh, M. R. (2003). "Oblique rectangular sharp-crested weir", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water and Maritime Engineering*, 156(2), 185-191.



## شبیه‌سازی عددی تأثیر هندسه شمع و فونداسیون بر روی آبشستگی موضعی در اطراف گروه‌پایه کج

با پیشرفت فناوری طراحی و ساخت سازه‌ها، شاهد ساخت پل‌ها با اشکال مدرنی می‌باشیم که از جمله آنها می‌توان به پل‌های با گروه‌پایه‌های کج اشاره کرد. با توجه به اهمیت شناخت مکانیزم‌های مؤثر بر آبشستگی این نوع از پایه‌های پل، در پژوهش حاضر به بررسی و شبیه‌سازی عددی تأثیر هندسه شمع و فونداسیون بر روی آبشستگی موضعی در اطراف گروه‌پایه کج با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. از طریق بررسی الگوی جریان اطراف گروه‌پایه‌ها مشخص گردید با تغییر تراز کارگذاری سرشمع در بستر رسوبی گردابه‌های تشکیل شده در بین پایه اول و دوم گروه‌پایه متفاوت بوده و هرچه تراز کارگذاری نزدیک به بستر و یا بالاتر از آن قرار گیرد، گردابه‌های تشکیل شده با قدرت بیشتری بر روی بستر اطراف گروه‌پایه کج تأثیر می‌گذارد. با بررسی پروفیل طولی آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج مشاهده گردید که شمع دوکی شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها اثر بهتری در کاهش آبشستگی از خود نشان می‌دهد. به طوری که، حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده در اطراف گروه‌پایه کج با حضور شکل دوکی شمع، مستطیلی و مستطیلی گردگوشه ۱۹/۶۱، ۱۴/۱۱ و ۶/۴۵ درصد نسبت به شکل استوانه‌ای شمع کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه اینکه، هرچه دماغه شمع آئرودینامیکی و تیز باشد، کنترل گرداب‌های نعل‌اسبی بهتر عمل می‌کند و این امر باعث کاهش عمق آبشستگی در اطراف گروه‌پایه کج می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** پل‌ها، اثرات آبشستگی، شمع، نرم‌افزار Flow-3D، شبیه‌سازی عددی.

رامتین صبح خیز فومنی  
کارشناس ارشد، دانشکده فنی  
مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد لاهیجان.

پست الکترونیک:

Sobkhizarman@yahoo.co.uk

### علیرضا مردوخ پور\*

استادیار، دانشکده فنی مهندسی،  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد  
لاهیجان.

پست الکترونیک:

alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

### ۱- مقدمه

رودخانه‌ها، گردابه‌های پیچیده در اطراف پایه‌ها به وجود می‌آید که باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه این گودال در اطراف پایه‌ها و نفوذ به زیر پی سازه، تخریب پل را به دنبال خواهد داشت. دو عامل برخورد جریان به پایه و جدا شدن جریان از پایه پل، باعث ایجاد چنین گردابه‌هایی می‌شود. برخورد جریان به پایه پل، گردابه نعل‌اسبی را شکل داده و جدایی جریان از پایه سبب به وجود آمدن گردابه‌های برخاستگی می‌شود. در صورت کاربرد گروه‌پایه، مکانیزم‌های دیگری نیز در مقدار آبشستگی مؤثر هستند. مکانیزم‌های مؤثر در آبشستگی گروه‌پایه اثر تقویت کردن،

بحث آبشستگی قدمتی طولانی در علم هیدرولیک داشته و به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و هم‌چنین به جهت نبودن رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، هم‌چنان مورد توجه خاص محققان علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه می‌باشد. با استقرار پایه‌های پل در مسیر جریان در

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸

(DOI): 10.22091/cer.2019.4278.1149 شناسه دیجیتال

اثر محافظت یا پناه دادن، گردابه‌های جاری و به‌هم‌فشرده‌گی گردابه‌های نعل اسبی می‌باشد [۱].  
اثر تقویت کردن باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود. به‌علت وجود پایه پشتی، حفره‌های آبشستگی دو پایه ممکن است روی هم‌قرار گرفته و تراز بستر در پشت پایه جلویی پایین افتد. در نتیجه جریان به‌راحتی ذرات را از چاله آبشستگی پایه جلویی حرکت داده و عمق آبشستگی در جلو پایه عمیق‌تر می‌گردد [۲].

به‌جهت اهمیت مسأله آبشستگی اطراف پایه‌های پل، تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با پارامترهای اثرگذار بر آبشستگی انجام شده است. نتایج تحقیقات انجام‌شده در رابطه با تأثیر پارامترهای هندسی پایه نظیر قطر پایه و یکنواختی سطح مقطع نشان داد که برای پایه با سطح مقطع یکنواخت، بیشینه عمق آبشستگی تا  $2/4$  برابر قطر پایه خواهد رسید [۲].

در شرایطی که سطح مقطع متفاوت باشد، نظیر شرایطی که پایه بر روی فونداسیون قرار گرفته است، بسته به تراز کارگذاری فونداسیون مقدار آبشستگی متفاوت می‌باشد [۲].

نتایج تحقیقات صورت‌گرفته حاکی از آن است برای شرایطی که فونداسیون در عمقی کمتر از بیشینه آبشستگی برای تک‌پایه قرار گیرد، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. علت این موضوع به کاهش سطح آبشستگی در عمق و در نتیجه عدم توانایی جریان برای تعریض چاله آبشستگی و تعمیق بیشتر وقتی که به فونداسیون می‌رسد، نسبت داده شد [۳].

همچنین در شرایطی که تراز کارگذاری فونداسیون بالاتر از بستر است، عمق آبشستگی نسبت به تک‌پایه افزایش می‌یابد [۴]. مطالعات انجام شده نشان داد که با کج‌شدگی پایه در صفحه موازی با جریان و به‌سمت بالادست، بر مقدار بیشینه آبشستگی افزوده

خواهد شد [۵]. مقایسه‌های انجام شده در خصوص تأثیر کج‌شدگی پایه بر تغییرات آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج حاکی از آن است که مقدار آبشستگی در گروه‌پایه کج از حالت تک‌پایه بیشتر بوده که این موضوع به‌دلیل تأثیر توام دو پایه و نیز کج‌شدگی آن به‌سمت بالادست می‌باشد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد در شرایط نصب پایه‌ها بر روی فونداسیونی که در زیر بستر و بالاتر از بیشینه عمق آبشستگی به‌ازای تک‌پایه قرار دارد، مقدار بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [۶]. در کنار مطالعه آبشستگی ناشی از پایه‌های پل، تأثیر آرایش شمع‌های مستقر در زیر فونداسیون نیز از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

شفرد<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴، براساس مفهوم قطر مؤثر پایه، رابطه‌ای را برای تخمین عمق آبشستگی گروه‌پایه‌ها ارائه نمودند [۷]. عطائی آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۱۰، روش‌های ارائه شده توسط HEC-18 و کولمن<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) در تخمین عمق آبشستگی اطراف گروه‌شمع‌ها را مورد بررسی قرار داده و رابطه اصلاحی برای این منظور ارائه دادند [۸].

عبدالدايم<sup>۳</sup> و همکاران، به مقایسه گروه شمع در آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل، با تغییر تعداد و فاصله شمع در آرایش مربعی‌شکل در دو جهت طولی و عرضی جریان پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که برای گروه شمعی که در یک ردیف در جهت جریان قرار داده شود، در صورتی که نسبت فاصله شمع مساوی یا بزرگتر از  $6/5$  برابر قطر شمع باشد، آبشستگی برای هر شمع به‌صورت منفرد عمل می‌نماید. همچنین زمانی که گروه شمع‌ها در چند ستون و ردیف مرتب شوند با افزایش فاصله بین شمع‌ها، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [۹].

1- Sheppard

2- Kolman

3- Abdeldayem

در رابطه (۱)،  $\dot{m}_{stored}$  بیانگر جرم ذخیره شده در داخل حجم کنترل،  $\sum \dot{m}_{in}$  بیانگر مجموع جرم‌های ورودی از طریق سطوح حجم کنترل و  $\sum \dot{m}_{out}$  نیز بیانگر مجموع جرم‌های خروجی از سطوح حجم کنترل است.



شکل ۱- حجم کنترل انتخابی و سطوح مرزی آن

چنانچه این معادله را به فرم انتگرالی و بر روی سطوح کنترل مورد نظر بیان شود، رابطه‌ی (۲) ایجاد خواهد شد:

$$\frac{\partial (\int \rho dV)}{\partial t} = - \int_A \rho (\vec{V}_{rel} \cdot d\vec{A}) \quad (2)$$

که در آن بردار سرعت نسبی  $\vec{V}_{rel}$  بیانگر اختلاف سرعت سیال و بردار سرعت حجم کنترل متحرک بوده و مثلاً سرعتی برابر با سرعت سیال داشته باشد، هیچگونه جرمی وارد آن یا از آن خارج نمی‌شود. اکنون ضروری است برای تبدیل انتگرال بر روی سطوح رابطه (۲)، به انتگرال بر روی حجم از تئوری دیورژانس<sup>۵</sup> استفاده نماییم. براساس تئوری دیورژانس، برای هر کمیت برداری مانند  $\vec{X}$  می‌توان رابطه (۳) را به‌عنوان تبدیل‌کننده انتگرال سطح به انتگرال حجم بیان نمود.

$$\int_A \vec{X} \cdot d\vec{A} = \int_V \text{div}(\vec{X}) dV \quad (3)$$

حال با فرض اینکه کمیت برداری  $\vec{X}$  برابر حاصلضرب یک کمیت اسکالر (مانند چگالی) و یک کمیت

در سال ۲۰۱۲، امینی و همکاران با مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی تحت شرایط مختلف فاصله بین شمع و تراز کارگذاری فونداسیون، رابطه‌ای برای تخمین عمق آبشستگی برای شرایط ارائه دادند [۱۰].

با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در خصوص بررسی آبشستگی اطراف گروه‌پایه کج مستقر بر گروه شمع صورت نگرفته است، هدف از انجام این تحقیق، تراز تأثیر هندسه شمع‌ها از نظر اشکال مختلف دوکی، مستطیلی، مستطیلی گردگوشه و دایره‌ای بر مقدار بیشینه عمق آبشستگی در اطراف گروه‌پایه کج می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

اولین قدم در مسیر شبیه‌سازی جریان، به‌دست آوردن معادلات حاکم بر این پدیده می‌باشد. پایه و اساس تمام روش‌های حل عددی برای مدل‌سازی، حل معادلات جریان می‌باشد که شامل یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنوم در جهت محورهای سه‌گانه مختصات می‌باشند که به معادلات ناویر استوکس<sup>۴</sup> معروف هستند. در این بخش از تحقیق حاضر، سعی شده است این معادلات به‌صورت کلی بیان شود. معادله پیوستگی به‌عنوان یکی از معادلات اساسی مکانیک سیالات، بیانی از قانون بقای جرم بوده و نشان می‌دهد تغییر جرم سیال محتوی یک حجم کنترل طی یک بازه زمانی مشخص، برابر با اختلاف مجموع جرم‌های ورودی و خروجی حجم کنترل می‌باشد [۹].

با فرض یک حجم کنترل انتخابی مطابق شکل ۱، برای نوشتن معادله پیوستگی خواهیم داشت:

$$\dot{m}_{stored} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

<sup>5</sup>- Divergence Theorem

<sup>4</sup>- Navier Stocks Equation

معادله (۱۰) می‌تواند به فرم فشرده مطابق معادله (۱۱) نوشته شود:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

در نهایت، معادله پیوستگی برای یک جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

## ۲-۱- تقریبات عددی در مدل عددی Flow-3D

نرم‌افزار Flow-3D، معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود، که برای هر سلول مقادیر میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند بجز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. موانع منحنی‌شکل، دیوارهای مرزی و سایر اشکال هندسی دیگر، به وسیله تعیین کسر مساحت وجوه و کسر حجم باز به جریان سلول، در شبکه در نظر گرفته شده جای می‌گیرند (روش کسر مساحت- حجم مانع<sup>۶</sup>). روش دقت مرتبه اول<sup>۷</sup> نسبت به افزایش زمان و مکان، روش عددی اصلی مورد استفاده در Flow-3D می‌باشد. زمانی که شبکه مورد استفاده در روش حجم محدود، غیریکنواخت است، می‌بایست در انتخاب درجه دقت حل عددی توجه کرد. در این حالت، روش دقت مرتبه دو<sup>۸</sup> مناسب‌تر است. در همه حالات، حداقل می‌توان از دقت درجه یک برای شرایط مرزی استفاده کرد. مثلاً، در سلول‌هایی که بخشی از آن توسط مانع اشغال شده، روش FAVOR، معادل با درون‌یابی خطی برای شرایط مرزی می‌باشد. در هنگام مدل کردن سطح آزاد آب، این

برداری (مانند سرعت) می‌باشد،  $\bar{X} = \rho \bar{V}$ ، با جایگذاری  $\bar{X}$  در رابطه (۳) و قرار دادن انتگرال حاصله در معادله (۲) به رابطه (۴) خواهیم رسید:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_V \rho dV \right) + \int_V \text{div}(\rho \bar{V}_{rel}) dV = 0 \quad (4)$$

در اعمال قضیه دیورژانس، فرض بر آن است که توابع چگالی  $\rho$  و سرعت  $\bar{V}$  توابعی کاملاً پیوسته می‌باشند. برای حالتی که تغییرات شکل حجم کنترل، نسبت به زمان ناچیز بوده و بتوان شکل حجم کنترل را ثابت فرض نمود تساوی (۵) برقرار است:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_V \rho dV \right) = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (5)$$

در این صورت رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\int_V \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_{rel}) \right] dV = 0 \quad (6)$$

حال چنانچه فرض کنیم که اندازه و ابعاد حجم کنترل به سمت صفر میل نماید، به طوری که دیگر تغییرات مکانی کمیت‌های موجود در داخل حجم کنترل قابل توجه نباشد، در این صورت خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_{rel}) = 0 \quad (7)$$

برای حالتی که حجم کنترل ثابت باشد، سرعت نسبی  $\bar{V}_{rel}$  برابر با سرعت سیال بوده و معادله پیوستگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}) = 0 \quad (8)$$

این معادله برداری به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

6- FAVOR  
7- 1<sup>st</sup> order  
8- 2<sup>nd</sup> order

$$f_S + f_L = 1 \quad (14)$$

بار معلق، لزجت واقعی سیال را افزایش می‌دهد. این افزایش تا زمانی ادامه دارد که جزء حجمی ذرات جامد ( $f_S$ ) به حد جزء حجمی چسبندگی ( $f_{SCO}^{13}$ ) برسد. پس از آن افزایش بار معلق، سبب بالارفتن لزجت نشده، بلکه سبب می‌شود ذرات شروع به فعالیت با رفتار جامدگونه کنند. در این حالت، لزجت متوسط سیال از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\mu^* = \mu_f \left[ 1 - \frac{\min(f_S, f_{SCO})}{f_{SCR}} \right]^{1.5} \quad (15)$$

که در آن  $\mu_f$  ویسکوزیته مولکولی سیال و  $f_{SCR}$  جزء بحرانی ذرات رسوب<sup>۱۴</sup> می‌باشد که مقدار پیش‌فرض آن ۰/۶۷ انتخاب شد.  $\mu^*$  ویسکوزیته افزایش یافته، به واسطه رسوبات معلق در سیال است که حداکثر آن، به‌ازای مقدار جزء بحرانی رسوبات برابر  $18\mu_f$  می‌باشد. اگر کسر حجمی رسوب، بیشتر یا مساوی مقدار  $f_{SCR}$  باشد، دانسیته رسوب متراکم برابر با  $f_{SCR} \times \rho_S$  می‌باشد که جزو شرایط اولیه مدل می‌باشد. چگالی ظاهری  $\bar{\rho}$  به‌صورت یک تابع خطی از حجم رسوبات فرض می‌گردد:

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_S(\rho_S - \rho_L) \quad (16)$$

$\rho_L$  و  $\rho_S$  به‌ترتیب دانسیته ظاهری ذرات رسوب و سیال هستند. طبق تعریف، دریفت<sup>۱۵</sup>، ته‌نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروهای شناوری مؤثر بر ذره رسوب است. در مدل آبستگي Flow-3D، ذرات رسوب به‌صورت کروی فرض شده که تحت اثر لزجت سیال قرار دارند. لذا مطابق رابطه زیر ضریب ته‌نشینی  $D_f$  به‌دست می‌آید:

$$D_f = \frac{d_{50}^2 \times (\rho_S - \rho_L)}{18\mu} \quad (17)$$

نرم‌افزار با استفاده از مدل حجم سیال<sup>۹</sup>، جزء حجم سیال  $F$  را با استفاده از معادله (۱۳) که معادله جابه‌جایی حاکم بر جزء حجم سیال  $F$  نامیده می‌شود، تعیین می‌نماید:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( \frac{\partial}{\partial x}(FUA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(FVA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(FWA_z) \right) = 0 \quad (13)$$

$F$ ، ضریبی است که بسته به میزان سیال در حجم کنترل، همواره مقداری بین صفر و ۱ دارد. به‌طوری‌که، اگر  $F$  برابر ۱ باشد، حجم کنترل (سلول محاسباتی) پر از سیال بوده و در صورتی که برابر صفر باشد، نشان‌دهنده این است که در سلول محاسباتی آبی وجود نداشته و کل حجم کنترل توسط هوا اشغال شده است [۱۱].

## ۲-۲- مدل فرسایش در مدل‌سازی آبستگي پایه پل

مدل فرسایش<sup>۱۰</sup> در نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی انتقال، فرسایش و ته‌نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات (قابل تعریف برای کلیه مصالح با مشخصات فیزیکی خاص) در اثر جریان سیال می‌باشد. این مدل از دو میدان غلظت بار معلق و بار بستر استفاده می‌کند. جابه‌جایی و بلند شدن رسوبات معلق با سیال، در اثر تغییر گرادیان فشار محلی است. این رسوبات معلق ممکن است ناشی از جریان ورودی حاوی ذرات معلق و یا فرسایش بستر ایجاد شوند. رسوبات بستر توسط ذرات مجاور، محدود بوده و لذا به‌راحتی جابه‌جا نشده و فقط در صورتی که به‌صورت فرسایش یافته در سطح مشترک بستر و سیال به بار معلق تبدیل شوند، حرکت می‌کنند. بار معلق در صورتی که بار بستر تبدیل می‌شود، که سرعت ته‌نشینی بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد. قسمتی از حجم کنترل که توسط ذرات جامد رسوب و سیال اشغال شده است، به‌ترتیب با نمادهای  $f_S^{11}$  و  $f_L^{12}$  تعریف می‌شود به‌طوری‌که:

9- VOF

10- Sediment Scour

11- Solid Volume Fraction

12- Liquid Volume Fraction

13- Cohesive Solid Fraction

14- Critical Solid Fraction

15- Drift

برشی جریان در آستانه حرکت ذره رسوب است. هدف از بسط و تشریح این مدل، تخمین و پیش‌بینی مقدار جریان رسوباتی است که از روی بستر مشترک، فرسایش یافته‌اند. به‌همین منظور، پارامتر سرعت برشی  $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$  برای اندازه‌گیری قدرت کف‌کنی جریان تعریف شده است و لذا سرعت کنده‌شدن رسوبات از بستر ( $u_{lift}$ ) را می‌توان مطابق رابطه زیر ارائه کرد:

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{cr}}{\rho}} \quad (21)$$

که در آن  $n_s$  بردار نرمال سطح بستر،  $\alpha$  پارامتر بی‌بعد معرف احتمال کنده شدن ذرات رسوب از بستر است که معمولاً برابر ۱ یا کمتر فرض می‌شود. زاویه استقرار طبیعی رسوبات در این مدل از رابطه (۲۲) حاصل می‌شود که در آن  $n$  بردار نرمال سطح و  $g$  بردار جاذبه است:

$$\theta = \frac{n}{|g|} \quad (22)$$

در جریان ساکن، زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب، میزان حداقل شبی که طی آن دیواره‌های حفره آبشستگی می‌تواند پایدار بماند را تعیین می‌کند. زاویه اصطکاک داخلی بالای رسوبات مانند رس، نشانگر پایداری دیواره در شیب تند است؛ اما در زوایای پایین مانند ماسه، دیواره تمایل بسیار برای ریزش و حرکت به جلو دارد.

تنش برشی بحرانی سطح شیب‌دار مؤثر در فرسایش مقطع در نرم‌افزار Flow-3D با تأثیر زاویه اصطکاک داخلی رسوبات که جزء ورودی مدل است توسط رابطه زیر ارائه می‌شود [۱۳]:

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}^0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \xi}} \quad (23)$$

مطابق رابطه فوق هنگامی که شیب طبیعی رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر شود ( $\varphi = \xi$ )، تنش برشی بحرانی برابر صفر می‌گردد ( $\tau_{cr} = 0$ ) و بدین معنی است که سطح بستر در اثر هر نوع تنش برشی

بنابراین برای محاسبه تنش‌نشی خواهیم داشت:

$$u_{dift} = D_f \times f_L \frac{\nabla p}{\rho} = \frac{f_L \times d_{50}^2}{18\mu} \frac{\nabla p}{\rho} (\rho_s - \rho_L) \quad (18)$$

در رابطه بالا،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوب،  $\mu$  لزجت سیال (آب)،  $\frac{\nabla p}{\rho}$  گرادیان پتانسیل مکانیکی یا شتاب بدنه (ذرات رسوب) می‌باشد.  $\frac{\nabla p}{\rho}$  تا ۱۰ برابر بزرگی شتاب ثقل قابل افزایش بوده تا تأثیرات نوسان عددی فشار محو شود. در مجاورت سطح آزاد سیال، شتاب بدنه با شتاب ثقل ( $g$ ) جایگزین می‌شود. از آنجاکه رسوب‌گذاری، فقط با حضور ذرات جامد (رسوب) امکان‌پذیر است، لذا ضریب  $f_L$  در صورتی که حجم کنترل، پر از رسوبات باشد، برابر صفر بوده و بنابراین  $u_{drif} = 0$  خواهد شد. همچنین مدل Flow-3D برای محاسبه نیروی شناوری و ضریب تنش‌نشی از رابطه زیر بهره می‌گیرد:

$$D_f = \begin{cases} \text{رابطه (۱۷) و (۱۸)} \\ \left[ \frac{f_s - f_{SCR}}{f_{SCO} - f_{SCR}} \right]^{-2} \left[ 1 - \frac{f_s - f_{SCR}}{f_{SCO} - f_{SCR}} \right] & (19) \\ 0 \end{cases}$$

در سطح رسوبات بستر، تنش برشی فعال بوده و سبب فرسایش و جابه‌جایی رسوب در سطح بستر می‌شود. این فرسایش، تابعی از تنش برشی سیال در سطح، تنش برشی بحرانی و چگالی سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی، حداقل تنش برشی مورد نیاز برای بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد [۱۲].

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_L - \rho_s)d} \quad (20)$$

در رابطه فوق،  $\theta_{cr}$  پارامتر شیلدز بحرانی و  $\tau_{cr}$  تنش

مدل آبشستگی پایه پل کج با استفاده از معادلات فرسایش ارائه شده در این بخش قابل شبیه‌سازی می‌باشد.

### ۲-۳- معرفی مدل‌های مورد بررسی تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر، مدل‌سازی جریان و آبشستگی اطراف پایه پل کج قرار گرفته بر روی گروه شمع‌ها با اشکال هندسی متفاوت انجام گرفته است. با توجه به اینکه، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحقیقات حل عددی، صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی می‌باشد، بنابراین در این تحقیق نیز در بخش صحت‌سنجی مدل، از طریق مقایسه عمق آبشستگی اطراف پایه پل کج قرار گرفته بر روی فونداسیون مکعبی‌شکل، از نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار Flow-3D و آزمایش‌های انجام شده توسط اسماعیلی‌ورکی و همکاران در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان استفاده شده است [۵].

با توجه به این‌که مدل آزمایشگاهی در مقیاس ۱/۱۹۰ نمونه واقعی پل هشتم اهواز انجام گرفته شده است، بدین ترتیب در تحقیق حاضر، جریان در کانالی به طول ۶، عرض ۰/۹۲ و ارتفاع ۰/۶ متر شبیه‌سازی و مطالعه شده است. شکل ۲، مشخصات کانال شبیه‌سازی شده به همراه مشخصات هندسی مدل‌های پایه پل قرار گرفته بر روی گروه شمع با اشکال هندسی متفاوت و جدول ۱، پارامترهای هیدرولیکی جریان در نظر گرفته شده تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

مقدار آبشستگی اطراف پایه‌های پل به پارامترهای متعددی بستگی دارد که هرکدام تأثیر خاص و متفاوتی بر مکانیزم آبشستگی داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار فرسایش بستر در اطراف پایه‌ها می‌گردد. پارامترهای مؤثر بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل، مجموعه‌ای از پارامترهای توصیف‌کننده مشخصات نوع سیال و رسوب بستر، هندسه پایه پل و شرایط هیدرولیکی جریان را شامل می‌گردد که آنها را می‌توان به صورت رابطه نوشت:

وارده، دچار فرسایش می‌شود. همچنین هنگامی که  $(\xi > \varphi)$  باشد، مقدار  $(\tau_{cr} < 0)$  بوده و بدین معنی است که رسوبات بدون وجود تنش برشی، دچار فرسایش می‌شوند. همچنین رابطه (۲۳)، نشان می‌دهد که هرچه زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب بزرگ‌تر شود، دیواره حفره آبشستگی، در صورت عدم وجود تنش برشی، دچار فرسایش می‌شود  $(\tau_{cr} = 0)$  که شیب دیواره  $\varphi$  بزرگ‌تر می‌شود [۱۳]. حرکت رسوبات معلق در سیستم، به وسیله معادله همرفت-پخش بیان می‌شود، به گونه‌ای که با اضافه کردن جمله‌های تهنشینی (Drifting) و بلندشدگی (Lifting) رسوب، معادله مذکور مطابق رابطه زیر می‌باشد:

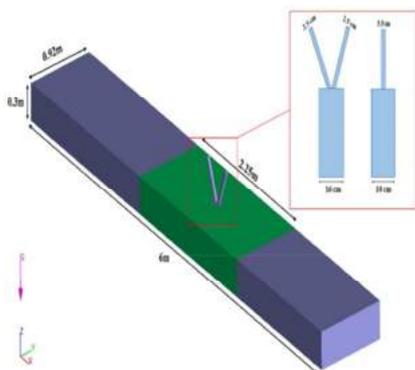
$$\left( \frac{\partial c_s}{\partial t} \right)_x + u \cdot \nabla c_s = D \nabla^2 c_s - u_{lift} \cdot \nabla c_s - u_{drift} \cdot \nabla c_s \quad (24)$$

که در آن،  $u$  سرعت محلی سیال (جریان) و  $u_{lift}$  و  $u_{drift}$  به ترتیب سرعت‌های مربوط به بلندشدگی و تهنشینی مصالح می‌باشند. در مجموع، مدل فرسایش در Flow-3D از یک رویکرد مستقیم و آسان برای مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در جریان سه‌بعدی بهره می‌برد. شبیه‌سازی انجام شده، نشان می‌دهد که در مدل‌سازی‌های مختلف در حالت تعادل، با نتایج تجربی به خوبی همخوانی دارند. در نسخه‌های قبلی این نرم‌افزار، محدودیت‌هایی در مدل آبشستگی وجود داشت که در نسخه جدید (v.11.2) برطرف شده است. در این محدودیت‌ها، ذرات درشت مصالح نمی‌توانست به درستی شبیه‌سازی شود؛ زیرا فرضیات حاکم بر بخش تهنشینی مدل نقض می‌شد. همچنین مدل نوعاً نیاز به مدل‌سازی بار بستر داشت که در آن ذرات رسوب بر روی بستر رسوبات متراکم، غلطش یا لغزش داشتند (یا این که در حین جریان سیال، معلق می‌شدند). همچنین برای بستر فرسایش‌پذیر، فقط یک نوع ذره برای مدل، قابل تعریف بود [۱۱]. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه،

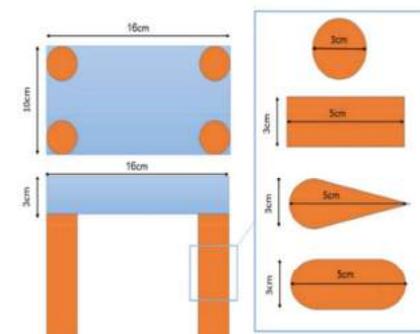
آن کوچک‌تر است،  $Z$  تراز کارگذاری سرشمع،  $U$  سرعت متوسط جریان،  $\rho$  چگالی آب،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $g$  شتاب ثقل،  $\alpha$  زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان،  $t$  زمان از شروع آبشستگی و  $t_e$  زمان تعادل آبشستگی می‌باشد.

$$f_1 = (y, d_s, D, D_p, T_p, d_p, l_m, l_n, D_{50}, Z, U, \rho, \mu, \alpha, t, t_e) \quad (25)$$

در این رابطه،  $y$  عمق جریان،  $d_s$  عمق آبشستگی،  $D$  عرض پایه پل،  $D_p$  عرض سرشمع،  $T_p$  ضخامت سرشمع،  $d_p$  قطر شمع،  $l_m$  فاصله شمع‌ها در یک ردیف،  $l_n$  فاصله شمع‌ها در یک ستون،  $D_{50}$  قطری که ۵۰ درصد ذرات از



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) مشخصات هندسی پایه پل کج و (ب) گروه شمع‌های قرار گرفته در زیر پایه

جدول ۱- مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولیکی جریان در مدل‌های تحقیق حاضر

مدل	سرعت نسبی ( $U/U_c$ )	عمق نسبی جریان ( $y/D^*$ )	تراز نسبی قرارگیری فونداسیون ( $Z/T_{pc}$ )
پایه پل کج بر روی فنداسیون مکعبی شکل	۰/۹۵	۱	هم سطح بستر
پایه پل کج بر روی گروه شمع استوانه‌ای	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع مستطیلی	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع مستطیلی گرد گوشه	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲
پایه پل کج بر روی گروه شمع دوکی شکل	۰/۹۵	۱	۱، -۱، -۲

چگونگی وارد نمودن اطلاعات مربوط به مدل و جریان در نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. یکی از گزینه‌های مهم در اعمال شرایط فیزیکی در بحث آبشستگی و انتقال رسوب، وارد کردن اطلاعات ذرات رسوب بستر می‌باشد. این امکان از طریق بخش‌های رسوب در آبشستگی انجام می‌گیرد. در

در شکل ۳، پارامترهای هندسی مهم و تأثیرگذار گروه پایه کج ارائه شده است.

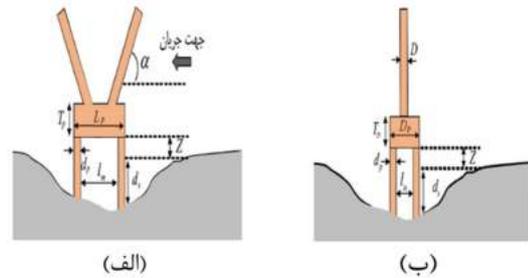
#### ۲-۴- مراحل شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار Flow-3D

در این بخش به مراحل مختلف نحوه شبیه‌سازی مدل عددی آبشستگی پایه پل کج و

گام بعدی مدل سازی، پس از شبکه بندی مدل، اعمال شرایط مرزی در ۶ وجه مکعب شبکه حل می باشد. برای وجه بالادست کانال که ورودی جریان محسوب می شود، می توان از شرایط مرزی میزان حجم سیال<sup>۱۶</sup>، فشار مخصوص<sup>۱۷</sup> و سرعت مخصوص<sup>۱۸</sup> استفاده کرد که برای تعریف جریان ورودی در آنها به ترتیب دبی، عمق جریان ورودی و سرعت اولیه جریان به نرم افزار داده می شود. در مدل مورد بررسی برای ورودی جریان از شرط مرزی میان حجم سیال، استفاده شده است و برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در هر اجزاء دبی ورودی مطابق جدول ۱ به نرم افزار معرفی شده است. برای قسمت خروجی کانال، شرایط مرزی دنباله دار<sup>۱۹</sup> و جریان خروجی<sup>۲۰</sup> به کار برده می شوند که در هر دو شرط، مشخصات جریانی که به این مرز می رسد، بدون هیچ تغییری به خارج از شبکه حل منتقل می شود. برای پایین دست کانال شبیه سازی شده، شرط مرزی جریان خروجی اعمال شده است.

برای جداره ها و کف شبکه حل که نقش دیواره ها و کف کانال را ایفا می کنند، از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. این شرط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار مجازی عمل می کند. لازم به ذکر است استفاده از تعریف شرط مرزی دیواره برای کف در شبکه حل، به عنوان کف کانال در صورتی صحیح می باشد که سطح کف کانال، کاملاً صاف و بدون زبری در نظر گرفته شود؛ در غیر این صورت بایستی در کف کانال، باکسی را تحت عنوان یک زیرمجموعه تعریف و زبری مورد نظر را بر آن اعمال نمود. کف کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان از جنس پلکس گلس صاف ساخته شده و در مدل شبیه سازی

جدول ۲ اطلاعات لازم برای اعمال مشخصات ذرات رسوبی بستر، مطابق با مشخصات ذرات رسوب آزمایش شده توسط اسماعیلی ورکی و همکاران وارد شده است [۵].

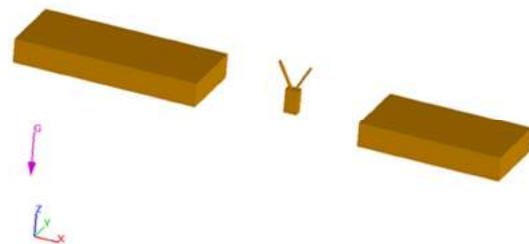


شکل ۳- تعریف پارامترهای هندسی گروه پایه کج (الف) در جهت جریان و (ب) در مقابل جریان

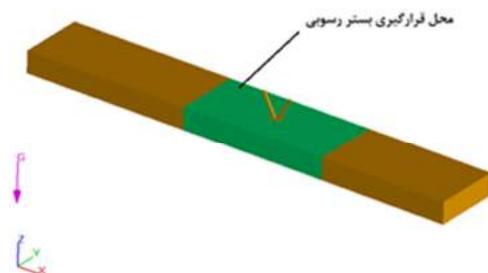
جدول ۲- اطلاعات ذرات رسوب بستر

۰/۰۰۰۷	قطر رسوب (متر)
۲۵۶۰	چگالی رسوب (کیلوگرم بر مترمربع)
۰/۰۳۲	عدد شیلدز بحرانی
۰/۷	ضریب جذب
۱۰	ضریب بار بستر
۳	زبری بستر

شکل های ۴ و ۵ هندسه سه بعدی کانال و باکس رسوب ماسه ای را نشان می دهند.



شکل ۴- هندسه سه بعدی کانال به همراه پایه پل کج در نرم افزار Flow-3D



شکل ۵- تعریف کل باکس ایجاد شده از رسوب ماسه ای

<sup>16</sup>- Volume flow rate

<sup>17</sup>- Specified Pressure

<sup>18</sup>- Specified Velocity

<sup>19</sup>- Continuitive

<sup>20</sup>- Outflow

## ۳-۱- آنالیز حساسیت مش‌بندی

در شبکه‌بندی مدل در محیط نرم‌افزار Flow-3D علاوه بر تعداد مش‌ها، اندازه آنها در هر راستا نیز می‌تواند بر روی نتایج مدل‌سازی تأثیرگذار باشد. برای حالتی که مش‌هایی با اندازه متغیر در یک راستا ایجاد می‌شود، نرم‌افزار به صورت خودکار تغییر اندازه مش‌ها در همان راستا را به صورت تدریجی اعمال می‌کند؛ ولی برای دو راستای متعامد، بایستی دقت نمود نسبت شکل یک سلول از شبکه حل، که از تقسیم بزرگ‌ترین بعد مکعب به کوچک‌ترین بعد آن به دست می‌آید، نباید بیشتر از ۳ باشد [۱۲]. برای مدل پایه کج مورد بررسی تحقیق، با شبیه‌سازی مدل در ۳ حالت مختلف و با اندازه مش‌های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آنها از روی داده‌های آزمایشگاهی و در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. برای این کار طبق جدول ۳، نتایج حداکثر عمق نسبی آبشستگی ( $d_s/D$ ) (نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عرض فنداسیون) مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی اسماعیلی ورکی و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت و میانگین قدرمطلق درصد خطا ( $MAPE^{24}$ ) و خطای جذر میانگین مربعات ( $RMSE^{25}$ ) برای هر یک محاسبه گردید. در روابط (۲۶) و (۲۷) نحوه محاسبه خطاها ارائه شده است.

$$MAPE (\%) = 100 \times \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{X_{exp} - X_{num}}{X_{exp}} \right| \quad (26)$$

$$RMSE (m^3/s) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (X_{exp} - X_{num})^2} \quad (27)$$

در این روابط،  $X_{exp}$  مقدار داده‌های آزمایشگاهی،  $X_{num}$  مقدار داده‌های عددی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

شده، سطح کف و دیواره‌های کانال صاف در نظر گرفته شده است.

برای مرز ارتفاع حداکثری نیز، شرط مرزی تقارن اعمال گردید. این نوع شرط مرزی، شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می‌گیرد. تا وقتی که جریان سیال به این مرز برخورد نکند، نرم‌افزار شرایط بالای سطح سیال تا بی‌نهایت را مشابه شرایط اتمسفر شبیه‌سازی می‌کند؛ ولی در حالتی که جریان سیال به این مرز برسد، شرایط بیرون شبکه حل، اشباع از سیال فرض شده و به طور غیرفیزیکی، جریان به صورت تحت فشار عمل خواهد کرد. به همین منظور، عدم برخورد جریان سیال با قسمت بالایی شبکه حل (ارتفاع کانال مدل در نرم‌افزار ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

پس از اعمال شرایط مرزی، شرایط اولیه برای مدل تعریف می‌شود. در این مرحله توزیع فشار در راستای  $Z$  هیدرواستاتیکی اعمال شد. همچنین به علت داشتن باکس ماسه‌ای (بستر رسوبی)، بایستی ناحیه‌های سیال و بستر رسوبی را به نرم‌افزار معرفی کرد. این ناحیه به نرم‌افزار مشخص می‌کند که ناحیه انتخابی، آب خالی نبوده و پوشیده از بستر رسوبی می‌باشد.

در بخش تعیین خروجی‌ها، پارامترهای قابل محاسبه توسط نرم‌افزار در شبیه‌سازی جریان، مشخص می‌شوند. در صورتی که در این قسمت، گام زمانی تعریف نشود، نرم‌افزار به صورت خودکار با گام‌های زمانی ۰/۱، زمان شبیه‌سازی نتایج را ذخیره می‌کند. در این مدل، گام زمانی ذخیره داده‌های خروجی نرم‌افزار، ۳ ثانیه و مهم‌ترین پارامترهای محاسباتی برای نرم‌افزار، داده هیدرولیکی<sup>۲۱</sup>، فشار<sup>۲۲</sup> و سرعت‌های سیال<sup>۲۳</sup> تعریف شد.

## ۳- تحلیل و تفسیر نتایج

21- Hydraulic Data

22- Pressure

23- Fluid velocities

24- Mean Absolute Percentage Error

25- Root Mean Square Error

جدول ۳- آنالیز حساسیت مش بندی در شبکه محاسباتی

خطای جذر میانگین مربعات RMSE	درصد میانگین خطای مطلق MAPE (%)	حداکثر عمق نسبی آبشستگی (ds/D) در نتایج عددی FLOW-3D	حداکثر عمق نسبی آبشستگی (ds/D) توسط اسماعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۲)	نسبت ابعاد حداکثر یا نسبت شکل	تعداد مش	حالت
۰/۲۹۶	۲۹/۸۹	۰/۶۹۴	۰/۹۹۰	۱/۸۶	۸۹۱۲۶۰	۱
۰/۱۹۹	۲۰/۱۰	۰/۷۹۱	۰/۹۹۰	۱/۴۳	۱۲۸۱۵۶	۲
۰/۰۹۲	۹/۲۵	۰/۸۹۸	۰/۹۹۰	۱/۰۱	۱۸۶۰۰۰۰	۳
نیازمند سیستم با پردازش بالا و صرف زمان بیشتر برای شبیه سازی					بیشتر از ۱۸۶۰۰۰۰	۴

$(d_s / D)_E$  حداکثر عمق نسبی آبشستگی اندازه گیری شده می باشد. در این تحقیق، در بخش صحت سنجی مدل، از مقایسه نمودار توسعه زمانی آبشستگی در زمان های مختلف اطراف گروه پایه کج، حاصل از نتایج شبیه سازی نرم افزار FLOW-3D و آزمایش های انجام شده توسط اسماعیلی ورکی و همکاران در رقوم کارگذاری فونداسیون  $Z/D=0$  (نسبت فاصله بستر جریان تا روی فونداسیون به عرض فونداسیون) استفاده شده است. شکل ۶ و ۷، به ترتیب مقایسه نمودار توسعه زمانی آبشستگی اطراف فونداسیون پایه کج در رقوم کارگذاری فونداسیون  $Z/D=0$  و  $U/U_c=0/95$  حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی و درصد خطای نسبی حاصل از مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی را نشان می دهد.

مشاهده می گردد که روند توسعه زمانی آبشستگی حاصل از نتایج عددی همانند روند نتایج آزمایشگاهی اسماعیلی ورکی و همکاران می باشد. با مشاهده شکل ۷ مقدار میانگین خطای نسبی حداکثر عمق نسبی آبشستگی نتایج حل عددی و مقدار خطای RMSE به ترتیب ۷/۳۴ درصد و ۰/۰۴۹ می باشد.

جدول ۴، مقادیر خطای نسبی و RMSE حداکثر عمق نسبی آبشستگی حاصل از نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی را برای زمان های مختلف نشان می دهد.

با توجه به خطاهای به دست آمده، حالت ۳ به عنوان مش بهینه با تعداد ۱۸۶۰۰۰۰ تعداد سلول محاسباتی انتخاب گردید. مش های ایجاد شده در هر راستای کانال به صورت یکنواخت با اندازه ۰/۹۹، ۰/۱ و ۰/۱ به ترتیب در راستای طولی، عرضی و ارتفاع انتخاب شده اند تا با ارائه بیشترین دقت محاسباتی، بهینه ترین زمان شبیه سازی را ایجاد نمایند. همچنین بیشترین نسبت شکل شبکه بندی در این مدل ۱/۰۱ به دست آمده که کوچک تر از ۳ می باشد. بنابراین از این نظر هم شبکه بندی استفاده شده، مناسب است. به منظور عدم تأثیرپذیری نتایج مدل، از تعداد و اندازه مش ها، شبکه بندی مدل های بررسی شده یکسان در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- صحت سنجی

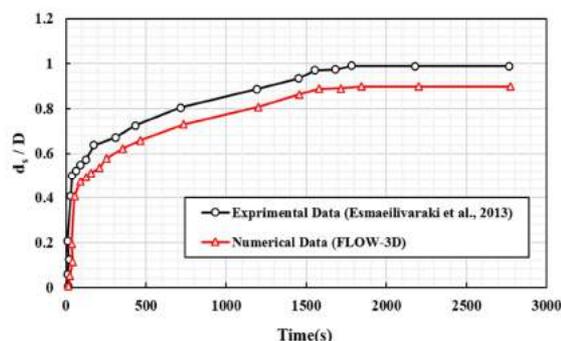
یکی از راه های صحت سنجی و مقایسه نتایج و همچنین تعیین محدوده درصد خطا بین داده های حاصل از نرم افزار FLOW-3D با داده های آزمایشگاهی استفاده از رابطه (۲۸) می باشد.

$$E = \frac{((d_s / D)_N - (d_s / D)_E)}{(d_s / D)_E} \times 100 \quad (28)$$

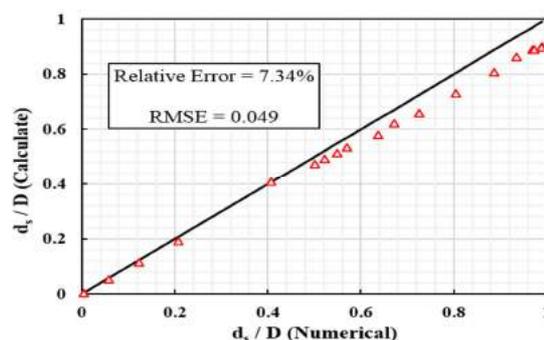
در رابطه فوق،  $E$  نشانگر درصد خطای نسبی،  $(d_s / D)_N$  حداکثر عمق نسبی آبشستگی در حل عددی و

به‌ترتیب به مقدار ۹/۲۵ درصد و ۰/۰۹۱ می‌باشد. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که تطابق نسبتاً خوبی بین مقادیر حل عددی و آزمایشگاهی وجود داشته و می‌توان سایر شرایط مدنظر را برای مدل اجرا نمود و نتایج مورد نیاز را تجزیه و تحلیل کرد.

شکل ۸، تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع را نشان می‌دهد. با مقایسه تغییرات تنش در شرایط کارگذاری سرشمع در ترازهای مختلف مشاهده می‌شود که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر رخ می‌دهد ( $Z/T_p = -1$ ) و با قرارگیری تراز کارگذاری سرشمع در تراز پایین‌تر از بستر ( $Z/T_p = -2$ )، بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر، می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین گروه‌پایه‌ها باشد، به‌طوری‌که وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان تشکیل شده در گروه‌پایه شده و عملکرد گروه‌پایه به‌صورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند.



شکل ۶- مقایسه توسعه زمانی آبستنگی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای  $U/U_c = 0.95$  و  $Z/D = 0$



شکل ۷- برازش مقادیر عددی و آزمایشگاهی حداکثر عمق نسبی آبستنگی ( $d_s/D$ )

با توجه به جدول، مشاهده می‌گردد که بیشترین

درصد خطای نسبی و مقدار RMSE برای دقیقه ۱۷۸۴

جدول ۴- مقادیر خطای نسبی و RMSE حداکثر عمق نسبی آبستنگی حاصل از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

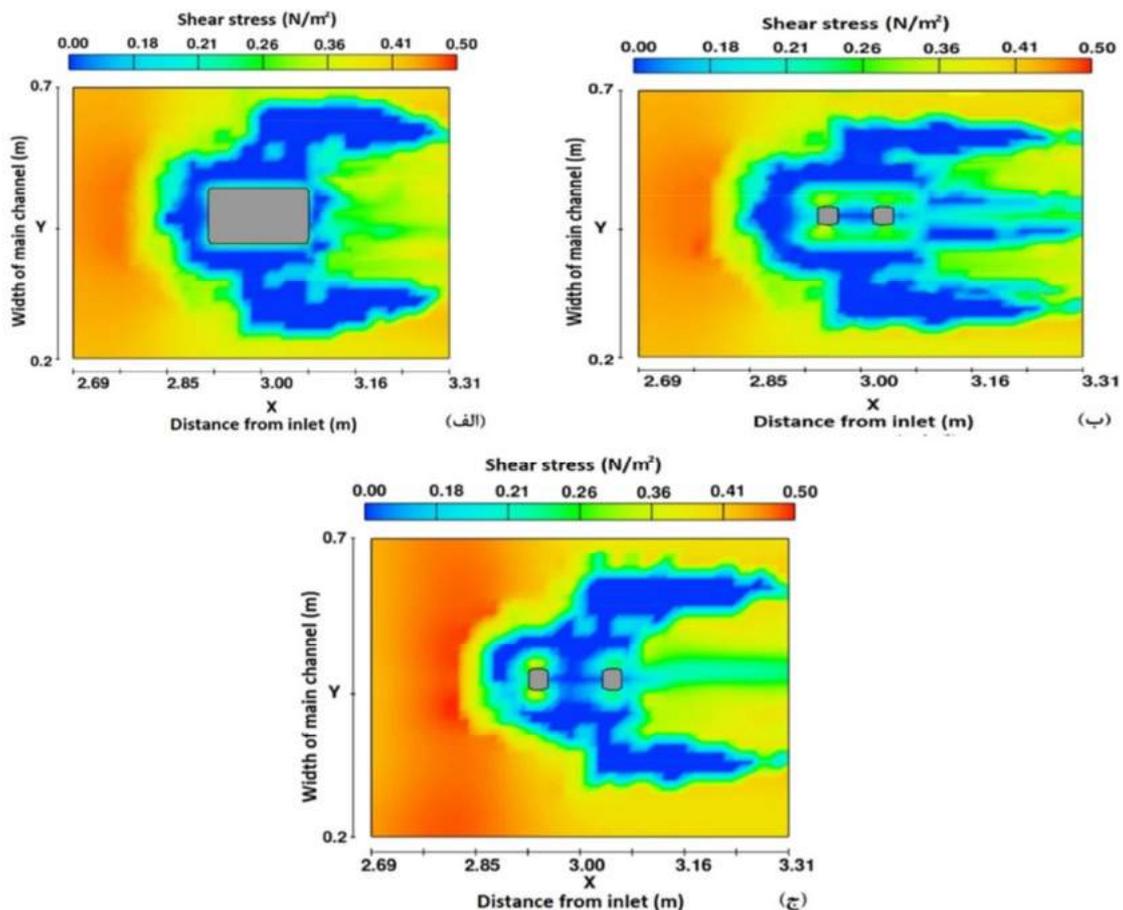
زمان (دقیقه)	حداکثر عمق نسبی آبستنگی در نتایج عددی	حداکثر عمق نسبی آبستنگی در نتایج آزمایشگاهی	درصد خطای نسبی (%)	RMSE
۱۷	۰/۱۱۵	۰/۱۲۳	۷/۲۰	۰/۰۰۸
۳۷	۰/۴۷۳	۰/۵۰۰	۵/۳۴	۰/۰۲۶
۸۹	۰/۵۱۳	۰/۵۴۸	۶/۴۹	۰/۰۳۵
۱۷۵	۰/۵۷۹	۰/۶۳۷	۹/۱۱	۰/۰۵۸
۳۱۲	۰/۶۲۳	۰/۶۷۲	۷/۲۶	۰/۰۴۸
۷۱۵	۰/۷۲۹	۰/۸۰۳	۹/۲۲	۰/۰۷۴
۱۵۵۳	۰/۸۸۸	۰/۹۶۹	۸/۳۳	۰/۰۸۰
۱۷۸۴	۰/۸۹۸	۰/۹۹۰	۹/۲۵	۰/۰۹۱
۲۷۶۷	۰/۸۹۸	۰/۹۸۸	۹/۱۲	۰/۰۹۰

تراز بالاتر از بستر هم صادق می‌باشد. علت آن به این شرح

کاهش تنش برشی در شرایط کارگذاری سرشمع در

جریان افزایش یابد. در شرایطی که تراز سرشمع بالاتر از بستر باشد، به دلیل بزرگتر بودن حجم گروه پایه نسبت به دو تراز دیگر، در بالادست گروه پایه و نزدیک بستر مقدار گردابه‌های جریان افزایش می‌یابد. در شرایط هم‌تراز بودن سرشمع با بستر رسوبی، مقادیر و محدوده توسعه گردابه‌های جریان در فاصله بین پایه اول و دوم نسبت به شرایط کارگذاری سرشمع در تراز پایین بستر، بیشتر می‌باشد که علت آن می‌تواند به خاطر تأثیر بیشتر پایه دوم بر الگوی جریان گروه پایه در حالت هم‌تراز بودن با بستر عنوان کرد.

است که در تراز کارگذاری سرشمع در شرایط بالاتر از بستر ( $Z/T_p=0$ ) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد. بنابراین با بررسی تغییرات تنش برشی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع، انتظار می‌رود که مقدار حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج در تراز هم‌سطح بستر روی دهد. در شکل ۹، مقدار گردابه جریان در صفحه X-Z در هر سه تراز کارگذاری سرشمع را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که هندسه گروه پایه، باعث شده است که در هر سه تراز کارگذاری سرشمع، در پایین دست پایه اول و دوم، مقدار گردابه‌های



شکل ۸- تنش برشی کل در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع (الف) بالاتر از بستر ( $Z/T_p=0$ )، (ب) هم‌تراز بستر ( $Z/T_p=-1$ ) و (ج) پایین تر از بستر ( $Z/T_p=-2$ )

تغییرات توسعه زمانی عمق آبشستگی اطراف گروه شمع برای شکل هندسی مختلف و تراز کارگذاری سرشمع ۱، ۲، ۱۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده

۳-۳- توسعه زمانی آبشستگی تحت شرایط مختلف تراز کارگذاری سرشمع

$R_1$  = شمع مستطیلی

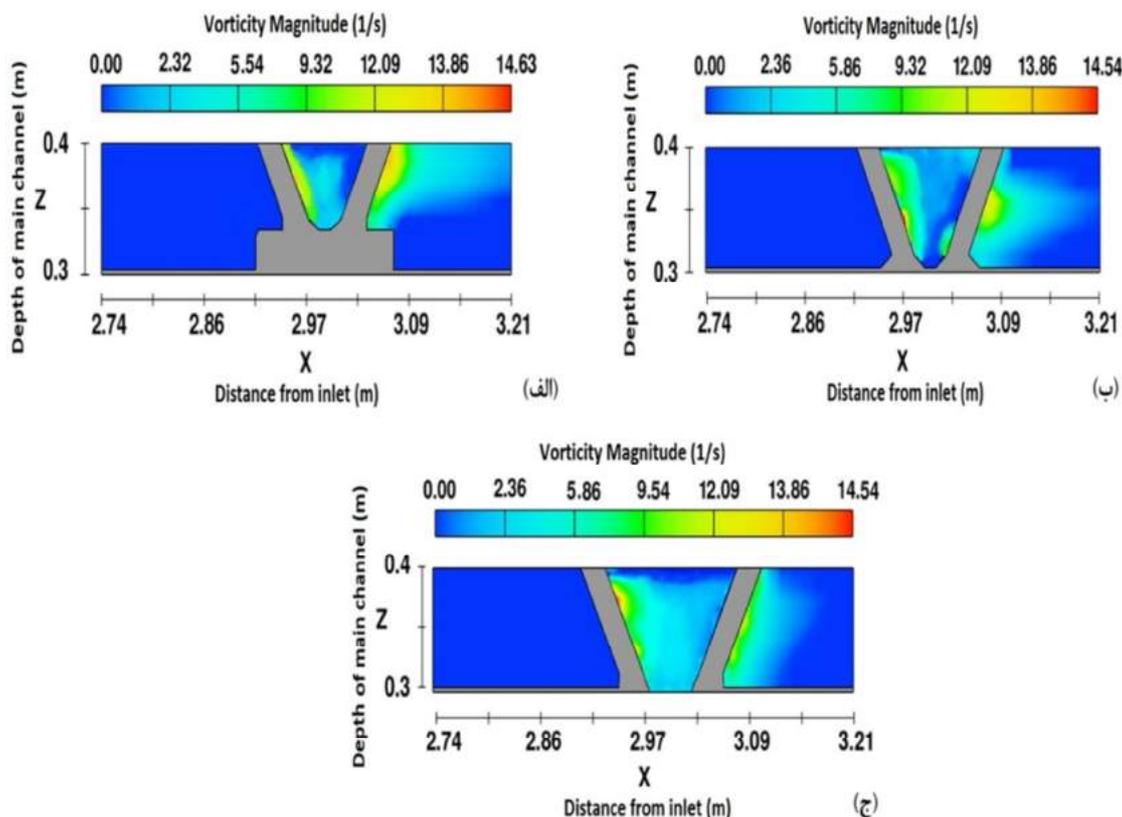
$P_1$  = شمع مستطیلی گردگوشه

$A_1$  = شمع‌های دوکی‌شکل

است. برای تفهیم بهتر، نام هندسی شمع‌های زیر گروه‌پایه

کج به صورت زیر می‌باشد:

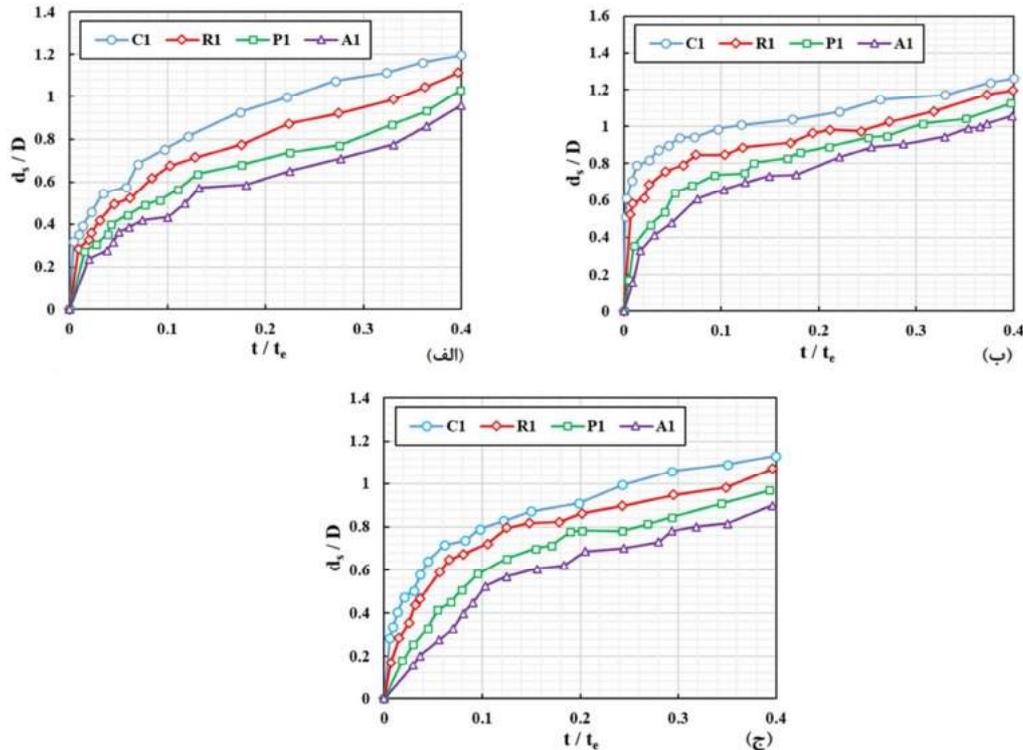
$C_1$  = شمع استوانه‌ای



شکل ۹- مقدار گردابه‌های جریانی در صفحه  $x-z$  در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع (الف) بالاتر از بستر ( $Z/T_p=0$ ), (ب) هم‌تراز بستر ( $Z/T_p=-1$ ) و (ج) پایین‌تر از بستر ( $Z/T_p=-2$ )

بخش فرسایشی زیر سرشمع در شکل دوکی شمع‌ها اتفاق می‌افتد. برای حالتی که سرشمع بالاتر از بستر می‌باشد ( $Z/T_p=0$ ) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد و باعث می‌شود که نسبت به شرایط هم‌ترازی سرشمع با بستر، چاله و عمق آبشستگی کمتری ایجاد گردد. در شرایط قرارگیری سرشمع پایین‌تر از بستر ( $Z/T_p=-2$ ) نیز به علت فاصله زیاد فضای زیر شمع با بستر جریان و کاهش قدرت نفوذی و گردابه‌های جریان به فضای زیر سرشمع، مقدار فرسایش و آبشستگی در فضای زیر سرشمع نسبت به دو تراز کارگذاری سرشمع دیگر کمتر می‌باشد.

مشاهده می‌شود که در هر سه تراز کارگذاری سرشمع تقریباً در مدت زمان کمتر از ۳۰ درصد حالت تعادل، بیشترین مقدار آبشستگی اتفاق افتاده است و بعد از آن از روند آبشستگی کاسته شده و تقریباً ثابت می‌گردد. در بین شرایط کارگذاری سرشمع بیشترین مقدار آبشستگی در حالتی که سرشمع هم‌تراز با بستر می‌باشد ( $Z/T_p=-1$ ) اتفاق می‌افتد. در این شرایط، به تدریج با خالی شدن فضای زیر سرشمع، بخشی از جریان به این بخش نفوذ کرده و باعث فرسایش و آبشستگی اطراف گروه شمع‌ها می‌گردد. نکته قابل ذکر این است که در این حالت، تأثیر شکل هندسی گروه شمع‌ها بر کاهش آبشستگی و فرسایش زیر سرشمع مؤثر بوده؛ به طوری که در شرایط یکسان کارگذاری سرشمع، کمترین چاله و



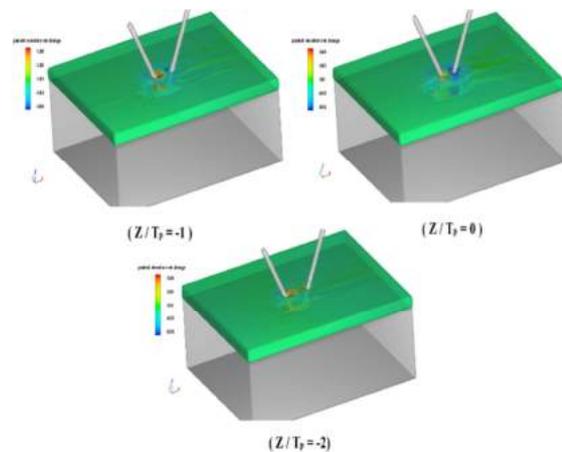
شکل ۱۰- توسعه زمانی آبشستگی برای شکل‌های هندسی مختلف شمع و در تراز مختلف کارگذاری سرشمع (الف) بالاتر از بستر ( $Z/T_p=0$ )، (ب) هم‌تراز بستر ( $Z/T_p=-1$ ) و (ج) پایین‌تر از بستر ( $Z/T_p=-2$ )

در شکل ۱۲، مقایسه نیم‌رخ طولی نهایی آبشستگی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع ارائه شده است. مقایسه نتایج بیشینه عمق آبشستگی در تراز کارگذاری مختلف سرشمع حاکی از آن است که در شرایط کارگذاری یکسان، بیشترین کاهش عمق آبشستگی برای شکل هندسی حالت دوکی شکل شمع‌ها اتفاق می‌افتد.

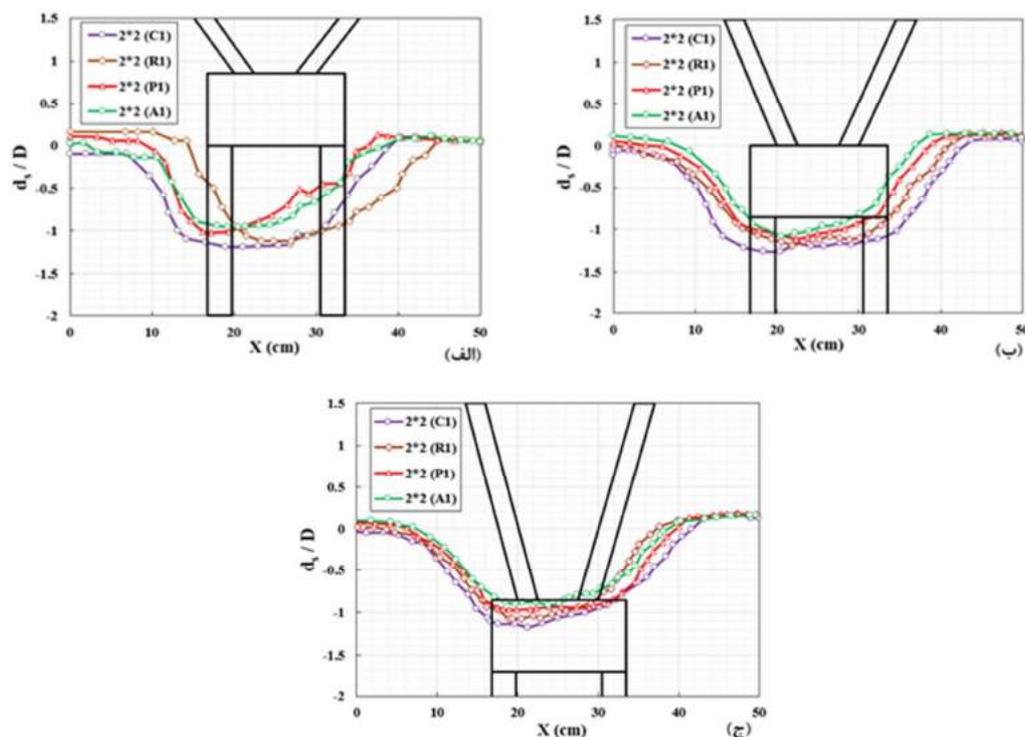
#### ۴- نتیجه‌گیری

یکی از اقدامات مقابله با آبشستگی و تخریب پایه‌های پل کاهش قدرت گردابه‌ها در مجاورت پایه و یا شمع‌های زیر آن، ایجاد و اصلاح هندسه آنها می‌باشد. در این تحقیق سعی گردید تأثیر شکل هندسی شمع‌های قرار گرفته در زیر پایه‌های کج و رقوم کارگذاری سرشمع در بستر رسوبی بر روی مشخصات آبشستگی اطراف گروه پایه کج به صورت عددی و با نرم‌افزار FLOW-3D مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بدین منظور، نتایج در این زمینه ارائه شده است.

شکل ۱۱، گودال آبشستگی ایجاد شده در اطراف گروه پایه کج و زیر سرشمع در تراز کارگذاری مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل نیز واضح است که میزان آبشستگی و گودال فرسایش در شرایطی که تراز کارگذاری سرشمع هم‌تراز با بستر و در زیر بستر قرار گرفته، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱۱- گودال آبشستگی اطراف گروه پایه کج با تراز کارگذاری سرشمع مختلف



شکل ۱۲- نیم‌رخ طولی نهایی آبستنگی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع (الف) بالاتر از بستر ( $Z/T_p=0$ ), (ب) هم‌تراز بستر ( $Z/T_p=-1$ ) و (ج) پایین‌تر از بستر ( $Z/T_p=-2$ )

آبستنگی ایجاد شده در اطراف گروه‌پایه کج با حضور شمع دوکی‌شکل  $3/36$  سانتی‌متر می‌باشد. این در حالی است که برای شمع‌های استوانه‌ای، مستطیلی و مستطیلی گردگوشه حداکثر عمق آبستنگی به ترتیب  $4/18$ ,  $3/91$ ,  $3/59$  سانتی‌متر می‌باشد. علت نقش مؤثرتر شکل دوکی‌شکل در کاهش آبستنگی، می‌تواند ناشی از نوع شکل هندسی آن در کاهش گرداب‌های برخاستگی باشد.

۳- با بررسی تغییرات توسعه زمانی عمق آبستنگی اطراف گروه شمع برای شکل هندسی مختلف و تراز کارگذاری سرشمع ۱-، ۲-،  $Z/T_p=0$  مشاهده گردید که در هر سه تراز کارگذاری سرشمع، تقریباً در مدت زمان کمتر از ۳۰ درصد حالت تعادل، بیشترین مقدار آبستنگی اتفاق افتاده است و بعد از آن از روند آبستنگی کاسته شده و تقریباً ثابت می‌گردد.

۱- با بررسی تنش برشی کل ایجاد شده در بستر جریان در ترازهای مختلف سرشمع مشاهده گردید که بیشترین تنش برشی در حالت کارگذاری سرشمع در تراز بستر ( $Z/T_p=-1$ ) رخ می‌دهد و با قرارگیری تراز کارگذاری سرشمع به تراز پایین‌تر ( $Z/T_p=-2$ ) از بستر، بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد. علت این امر، می‌تواند ناشی از افزایش فاصله بین گروه‌پایه‌ها باشد، به طوری که وجود پایه دوم باعث کاهش الگوی جریان در گروه‌پایه شده و عملکرد گروه‌پایه به صورت دو پایه مستقل در تشکیل الگوی جریان رفتار می‌کنند.

۲- با بررسی پروفیل طولی آبستنگی اطراف گروه‌پایه کج با شکل هندسی مختلف شمع‌ها، مشاهده شد که شمع دوکی‌شکل نسبت به سایر شکل شمع‌ها، اثر بهتری در کاهش آبستنگی از خود نشان می‌دهد. به طوری که حداکثر عمق

نیز به علت فاصله زیاد فضای زیر شمع با بستر جریان و کاهش قدرت نفوذی و گردابه‌های جریان به فضای زیر سرشمع، مقدار فرسایش و آبستتگی در فضای زیر سرشمع نسبت به دو تراز کارگذاری سرشمع دیگر کمتر باشد.

۶- با مقایسه نیم‌رخ طولی نهایی آبستتگی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع مشاهده گردید که در شرایط کارگذاری یکسان، بیشترین کاهش عمق آبستتگی برای شکل هندسی حالت دوکی شکل شمع‌ها اتفاق می‌افتد و هرچه دماغه شمع آئرو دینامیکی و تیز باشد، در کنترل گردابه‌های جریان بهتر عمل می‌کند و این امر باعث کاهش عمق آبستتگی می‌گردد. همچنین در شرایط تراز کارگذاری سرشمع به صورت هم‌ترازی با بستر به علت تأثیر بیشتر و قدرت نفوذ بیشتر جریان به فضای زیر سرشمع و طبعاً قدرت فرسایشی بالا، مقدار حداکثر عمق آبستتگی در این تراز اتفاق می‌افتد.

۴- در بین شرایط کارگذاری سرشمع، بیشترین مقدار آبستتگی، در حالتی که سرشمع هم‌تراز با بستر می‌باشد ( $Z/T_p = -1$ ) اتفاق می‌افتد. در این شرایط، به تدریج با خالی شدن فضای زیر سرشمع، بخشی از جریان به این بخش نفوذ کرده و باعث فرسایش و آبستتگی اطراف گروه شمع‌ها می‌گردد. نکته قابل توجه در این حالت، تأثیر شکل هندسی گروه شمع‌ها بر کاهش آبستتگی و فرسایش زیر سرشمع مؤثر بوده است؛ به طوری که در شرایط یکسان کارگذاری سرشمع، کمترین چاله و بخش فرسایشی زیر سرشمع در شکل دوکی شمع‌ها اتفاق می‌افتد.

۵- برای حالتی که سرشمع بالاتر از بستر بوده ( $Z/T_p = 0$ ) ضخامت سرشمع همانند طوقه عمل کرده و مانع از برخورد مستقیم گردابه‌ها به بستر رسوبی می‌گردد و باعث می‌شود که نسبت به شرایط هم‌ترازی سرشمع با بستر، چاله و عمق آبستتگی کمتری ایجاد گردد. در شرایط قرارگیری سرشمع پایین‌تر از بستر ( $Z/T_p = -2$ )

## مراجع

- [1] Breusers, H. N. C., & Raudkivi, A. J. (1991). IAHR hydraulic structures design manual: Scouring, Vol. 2. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [2] Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.
- [3] Parola, A. C., Mahavadi, S. K., Brown, B. M., & El Khoury, A. (1996). "Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(1), 35-40.
- [4] Jones, J. S., Bertoldi, D., & Stein, S. (1995). Alternative scour countermeasures. In *Stream Stability and Scour at Highway Bridges: Compendium of Stream Stability and Scour Papers Presented at Conferences Sponsored by the Water Resources Engineering (Hydraulics) Division of the American Society of Civil Engineers* (pp. 854-854). ASCE.
- [5] Esmaili Varaki, M., Sadat Jafari, M., Ayoubzadeh, A., & Rostami, M. (2016) "Simulation of the flow pattern around the inclined pier group using the Flow-3D numerical model", 30(6), 1860-1873
- [6] Melville, B. W., & Raudkivi, A. J. (1996). "Effects of foundation geometry on bridge pier scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(4), 203-209.
- [7] Sheppard, D. M., Melville, B., & Demir, H. (2013). "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.
- [8] Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z., & Beheshti, A. A. (2010). "Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(6), 343-351.
- [9] Abdeldayem, A. W., Elsaed, G. H., & Ghareeb, A. A. (2011). "The effect of pile group arrangements on local scour using numerical models", *Advances in Natural and Applied Sciences*, 5(2), 141-146.

- [10] Amini, A., Melville, B. W., Ali, T. M., & Ghazali, A. H. (2011). "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 177-185.
- [11] Sheppard, D. M., Melville, B., & Demir, H. (2013). "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.
- [12] Ghasemzadeh, F., & Shinyzadeh, p. (2015). Simulation of hydraulic issues in Flow-3D. *Innovative publishing. Tehran. Iran*
- [13] Maroosi, M., Roshan, R., & Sarkordeh, H. (2014). Analysis and design with Flow-3D software, *Fadak isatist publication, First printing, Tehran, Iran* (in farsi)
- [14] Khaple, S., Hanmaiahgari, P. R., Gaudio, R., & Dey, S. (2017). "Interference of an upstream pier on local scour at downstream piers", *Acta Geophysica*, 65(1), 29-46.
- [15] Hoang, N. D., Liao, K. W., & Tran, X. L. (2018). "Estimation of scour depth at bridges with complex pier foundations using support vector regression integrated with feature selection", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(3), 431-442.

## محمد شکراللهی

دانشجوی کارشناسی ارشد  
سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده  
مهندسی عمران، دانشگاه  
سمنان.

پست الکترونیک:

Behnam1995@gmail.com

## خسرو حسینی\*

دانشیار، دانشکده مهندسی  
عمران، دانشگاه سمنان.

پست الکترونیک:

khoseini@semnan.ac.ir

## سید فرهاد موسوی

استاد، دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه سمنان.

پست الکترونیک:

Mousavi\_sf@yahoo.com

## مدل‌سازی عددی اثر تغییر هندسه سازه راه‌ماهی

### بر جریان عبوری از بازشدگی قائم آن

در پژوهش حاضر، ویژگی‌های جریان عبوری از بازشدگی قائم راه‌ماهی با استفاده از مدل عددی Flow-3D شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردیده است. نتایج بررسی نشان داد که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  دقت خوبی در مدل‌سازی عددی ماهی‌رو نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی دارد. در ادامه، الگوی سرعت، حجم محدوده استراحت ماهیان و تلاطم جریان در راه‌ماهی تحلیل گردیده است تا بتوان عملکرد راه‌ماهی را با هندسه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد. در این رابطه، نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک هر سلول، زاویه انتهایی دیواره و نسبت عرض خالص ورودی به عرض حوضچه، به‌عنوان پارامترهای بی‌بعد تأثیرگذار در عملکرد حوضچه بررسی شدند. نتایج نشان داد که با کاهش نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک، مؤلفه طولی سرعت جریان به‌طور متوسط ۲۵/۱۱ درصد کاهش یافته است. با افزایش زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه، حجم استراحت حدود ۳٪ افزایش داشته است. همچنین، با افزایش پارامتر زاویه انتهایی دیواره بزرگ، انرژی آشفتگی به‌طور متوسط ۳۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. به‌طور کلی، نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک تأثیر بیشتری بر روند کاهش سرعت جریان برای عبور ماهیان از ماهی‌رو داشته و همچنین با افزایش زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه، محیط استراحت ماهیان و انرژی آشفتگی افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: راه‌ماهی، پروفیل سرعت، آشفتگی، ناحیه استراحت، Flow-3D.

## ۱- مقدمه

سدهای مخزنی و بندهای انحرافی تعبیه می‌شود [۱]. وظیفه مهم سازه راه‌ماهی، ایجاد مسیر مطمئن جهت عبور ماهی‌های مهاجر می‌باشد. سازه‌های راه‌ماهی انواع مختلفی دارند که در این پژوهش به بررسی خصوصیات جریان راه‌ماهی با بازشدگی قائم<sup>۲</sup> پرداخته شده است. اولین راه‌ماهی ساخته شده از نوع بازشدگی قائم در سال ۱۹۶۱ در کشور کانادا بوده است [۲]. همچنین، اولین مطالعات مربوط به این نوع راه‌ماهی توسط راجاراتنام<sup>۳</sup> و همکاران انجام شده است. ایشان با بررسی ۱۸ استخر در راه‌ماهی با بازشدگی قائم، رابطه خطی بین ارتفاع آب و دبی را

احداث سدها و بندهای انحرافی و استفاده از منابع آب سطحی با وجود فواید زیادی که داشته‌اند، باعث تغییر و تحول در محیط‌زیست و حیات آبیان نیز گردیده‌اند. از مهم‌ترین اثرات محیط‌زیستی ساخت سد و بند انحرافی، جلوگیری از عبور ماهیان می‌باشد. به‌منظور رفع این مشکل، سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان راه‌ماهی<sup>۱</sup> در بدنه

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۰۵/۱۳۹۸، بازنگری ۲۷/۰۶/۱۳۹۸، پذیرش ۰۶/۰۷/۱۳۹۸.

(DOI): 10.22091/cer.2019.4691.1162 شناسه دیجیتال

<sup>۱</sup>- Fishway

<sup>۲</sup>- Vertical slot

<sup>۳</sup>- Rajaratnam

آزمایشگاهی و سپس مدل‌سازی عددی، به بررسی سرعت و آشفتگی در راه‌ماهی‌ها با بازشدگی قائم پرداختند و دریافتند که با تغییر شکل دیواره جداکننده بزرگ به حالت L شکل، سرعت ۴۳٪ کاهش پیدا می‌کند [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ در بررسی عددی راه‌ماهی با بازشدگی قائم، اثر تغییر زاویه دیواره بر سرعت و آشفتگی انرژی نیز مورد پژوهش قرار گرفت [۱۴]. براوو کوردوبا<sup>۶</sup> و همکاران، به بررسی اثر روزه در شرایط مستغرق در راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم پرداختند. در پژوهش ایشان، روزه‌هایی به طول و عرض ۰/۲ متر در نظر گرفته شده و رفتار راه‌ماهی با حضور این روزه‌ها سنجیده شده است. نتایج این پژوهش، حاکی از عملکرد خوب این نوع راه‌ماهی نسبت به راه‌ماهی بدون روزه بوده است [۱۵]. پژوهشگران با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM به تحلیل راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم با مدل‌های مختلف آشفتگی مانند LES و k-ε پرداختند. آنها دریافتند که با استفاده از این نرم‌افزار، مشخصه‌های جریان مانند سرعت و آشفتگی جریان به خوبی پیش‌بینی می‌شود [۱۶]. در سال ۲۰۱۹ مطالعه عددی راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم انجام شد. محققان در این پژوهش اثر شیب بستر را بر عملکرد این نوع راه‌ماهی با نرم‌افزار ANSYS ارزیابی کردند و دریافتند که سرعت جریان با شیب بستر رابطه دارد [۱۷]. احسانی و همکاران، به بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان در راه‌ماهی از نوع کانال ماهی- قایق پرداختند. آنها آزمایش‌ها را در ۶ دبی و با شیب ۴٪ انجام دادند. در پژوهش ایشان، برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی از لوله‌های پلی‌اتیلنی تحت عنوان برس استفاده شد. محققان دریافتند که پس از هر برس، یک ناحیه با سرعت کم تشکیل شده که بهترین مکان برای استراحت ماهی است. همچنین، سرعت‌های به‌دست آمده در بازشدگی‌های مختلف از حداکثر سرعت ماهی طرح کمتر بوده و این امر باعث سهولت در مهاجرت ماهی می‌شود

به‌دست آوردند. همچنین، رابطه‌ای برای سرعت بیشینه نیز ارائه کردند [۳ و ۴]. در سال‌های اخیر، محققین متعددی به بررسی راه‌ماهی با بازشدگی قائم پرداخته‌اند [۵-۹]. از مزایای راه‌ماهی با بازشدگی قائم این است که ویژگی‌های هیدرولیکی در چنین جریانی به‌صورت نیمه مستقل از دبی و یا تغییرات عمق جریان است [۱۰]. همچنین، ماهی در این سازه از هر ارتفاعی که تمایل داشته باشد می‌تواند عبور کند [۱۱]. در ادامه، به بررسی مطالعات مهم دو دهه اخیر در این مورد پرداخته می‌شود. کیم<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۰، با انجام آزمایش‌هایی برای تخمین شرایط هیدرولیکی برای انواع راه‌ماهی حوضچه سرریز، به طراحی بهینه‌ای برای این راه‌ماهی دست یافتند. آنها به این نتیجه رسیدند که سرریز مستطیلی با یک شکاف با چیدمان مستقیم نسبت به حالت زیگزاگی برتری دارد و شرایط هیدرولیکی مناسب‌تری را برای مهاجرت ماهی فراهم می‌کند. همچنین، سرریز دوزنقه‌ای تا زمانی که جریان پایدار است و موجب ایجاد محل استراحت گردد، مناسب می‌باشد [۱۲]. محققان در سال ۲۰۰۴ نیز به بررسی آزمایشگاهی راه‌ماهی روزه‌ای پرداختند و رابطه‌ای بی‌بعد همانند محققین پیشین برای دبی و ارتفاع آب به‌دست آوردند. همچنین، با بررسی الگوی جریان، مناطق داخل استخر در راه‌ماهی روزه‌ای را به دو دسته مناطق چرخشی و یا جریان برگشتی و مناطق با جریان مستقیم تقسیم‌بندی کردند [۱۳]. تاراده<sup>۵</sup> و همکاران، مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات جریان آشفته در انواع مختلف راه‌ماهی با بازشدگی قائم انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوی جریان به نسبت طول و عرض حوضچه وابسته است و همچنین رابطه‌ای قوی بین نیروی استهلاکی محاسبه شده و انرژی متوسط جنبشی سرعت وجود دارد [۷]. در سال ۲۰۱۶ پژوهشگران با مطالعه

4- Kim

5- Tarrade

6- Bravo-Córdoba

FLOW-3D استفاده نشده و عملکرد شبیه‌سازی این نرم‌افزار ارزیابی نشده است. علاوه بر این، به تأثیر زاویه دیواره جداکننده بزرگ و همچنین نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک در مطالعات گذشته کمتر توجه شده است. در این مطالعه، به بررسی عددی راه‌ماهی با بازشدگی قائم با توجه به تغییر زاویه دیواره بزرگ و طول دیواره‌ها پرداخته شده است. در نهایت، با نگاهی تازه به خصوصیات جریان مانند مؤلفه طولی سرعت در عمق، آشفتگی جریان و حجم استراحتگاه ماهیان در حوضچه‌ها، سعی در ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد این نوع راه‌ماهی گردیده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات سازه راه‌ماهی

در پژوهش انجام شده توسط بومباک<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۷، به بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر بازشدگی ورودی و خروجی حوضچه پرداخته شده است. این پژوهش، در کانالی با طول ۳۸، عرض ۲/۲ و طول هر حوضچه ۳ متر انجام شد (شکل ۱). حوضچه شماره ۵ محل قرائت سرعت می‌باشد. در این پژوهش دریافتند که مدل PCFLOW2D به‌خوبی سازه راه‌ماهی را شبیه‌سازی کرده و پارامتر استهلاک انرژی محاسبه شده در این نرم‌افزار در محدوده قابل قبولی بوده است [۱۴]. همچنین، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش با مطالعات کوردا<sup>۸</sup> تطابق خوبی داشت [۲۳].

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی جریان در سازه راه‌ماهی با بازشدگی قائم با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D با تمام جزئیات مشابه پژوهش آزمایشگاهی بومباک و همکاران [۱۴] انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی نیز، از داده‌های این مرجع آزمایشگاهی استفاده شده است.

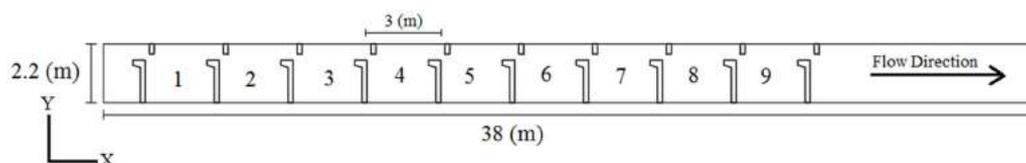
[۱۸]. در سال ۱۳۹۷ بهاروند و همکاران، به بررسی عددی راه‌ماهی با بازشدگی قائم پرداختند. آنها در این بررسی، مطالعه خود را به قسمت محیط استراحت در سازه راه‌ماهی معطوف کردند. در این شبیه‌سازی، از ۴ دبی مختلف استفاده شد و در ۳ عمق نسبی ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۷۵، محیط استراحت را برای ماهی آزاد چینوک بررسی کردند. ایشان دریافتند که با افزایش دبی، کاهش ۱۱ تا ۲۰ درصدی محیط استراحت در رده سنی نوجوان تا بالغ پدید خواهد آمد. همچنین، پس از شبیه‌سازی‌های انجام شده مشخص گردید که عمق نسبی ۰/۲ به‌عنوان مساعدترین صفحه استراحتی برای عبور ماهیان به بالادست جریان در میان ترازهای ۰/۵ و ۰/۷۵ است [۱۹]. بدری و همکاران نیز سعی در ارائه مبانی بومی‌سازی طراحی راه‌ماهی شبه‌طبیعی و طراحی آن برای رودخانه‌های ایران داشتند. آنها با استفاده از مدل ریاضی PHABSIM زیستگاه راه‌ماهی طراحی شده را ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که ماهیان در زیستگاه خیزآب، برخلاف زیستگاه استخرها، کناره‌های راه‌ماهی را به‌دلیل سرعت‌های مطلوب‌تر به‌عنوان زیستگاه انتخاب می‌کنند [۲۰].

معمولاً ارزیابی عملکرد این سازه به کمک روش‌های آزمایشگاهی صورت می‌گیرد که غالباً هزینه‌بر می‌باشند. به‌منظور سرعت بخشیدن به بهینه‌سازی عملکرد این سازه، از روش‌های با هزینه کمتر استفاده می‌شود. این تحقیق، در راستای بهینه نمودن عملکرد سازه راه‌ماهی صورت گرفته است.

با مطالعه پژوهش‌های اخیر انجام شده در زمینه راه‌ماهی، می‌توان دریافت که در زمینه آزمایشگاهی مطالعات نسبتاً خوبی انجام شده است؛ ولی در زمینه عددی و نرم‌افزاری مطالعات محدود می‌باشد. در صورتی که اگر مطالعات نرم‌افزاری جواب قابل قبولی ارائه دهند چون هم از نظر اقتصادی و هم از نظر زمانی مقرون به‌صرفه‌تر هستند، می‌توان به آنها اعتماد کرد. در پژوهش‌های اخیر صورت گرفته به‌صورت عددی از نرم‌افزار

7- Bombac

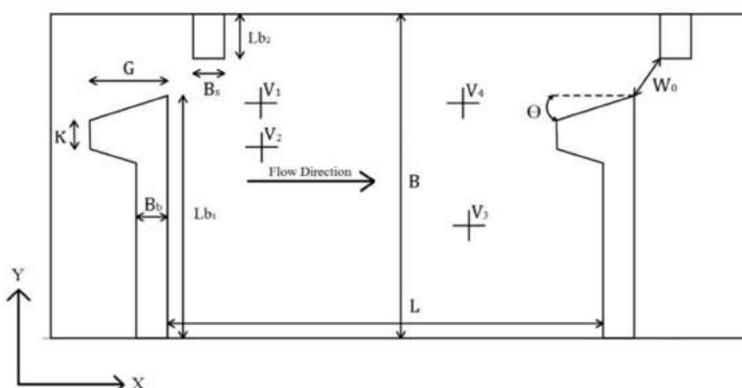
8- Chorda



شکل ۱- مشخصات کانال آزمایشگاهی و محل قرائت سرعت [۱۴]

داده شده است که سه مؤلفه طولی، عرضی و عمقی سرعت را برداشته‌اند. شکل ۲ اطلاعات هندسی و محل اندازه‌گیری پارامتر سرعت در راهمایی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اطلاعات آزمایشگاهی مربوط به  $V_2$  و  $V_3$  کافی نبود و برای صحت‌سنجی از داده‌های مربوط به  $V_1$  و  $V_4$  استفاده شده است.

نرم‌افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات می‌باشد و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده، کاربرد فراوانی دارد. در فاصله عرضی  $1/6$  متر از دیواره کانال و فاصله طولی  $1/6$  و  $1/6$  متر از دیواره بزرگ، دو عدد ADV قرار



شکل ۲- مشخصات هندسی یک واحد از سازه آزمایشگاهی و محل‌های اندازه‌گیری سرعت ( $V_1$  تا  $V_4$ )

ناحیه مورد نظر، با اعمال شرایط مرزی مشخص، به پیش‌بینی رفتار سیال می‌پردازد. مدل مذکور، به‌طور همزمان، معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس و معادله پیوستگی را حل می‌کند. معادله پیوستگی (رابطه ۱) و معادله ناویر-استوکس (رابطه ۲)، برای سیال تراکم‌ناپذیر به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (2)$$

که  $u_i$  مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت  $i$  (m/s)،  $\nu$  لزجت دینامیک سیال ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )،  $\rho$  چگالی سیال ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )،  $g_i$

جدول ۱، مشخصات هندسی سازه راهمایی پیشنهادی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در پژوهش بومباک [۱۴] یک  $\theta$ ، دو نسبت  $W_0/B$ ، شش  $L_{b2}$  و دو  $L_{b1}$  در نظر گرفته شده است. در جدول ۱،  $\theta$  زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیوار حوضچه،  $W_0$  بازشدگی ورودی و خروجی حوضچه و  $L_{b1}/L_{b2}$  نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک می‌باشد. مقدار پارامتر  $W_0$  بین  $0.3$  تا  $0.6$  متر، پارامتر  $L_{b1}$  بین  $1/45$  تا  $1/65$  متر و پارامتر  $L_{b2}$  بین  $0.3$  تا  $0.5$  متر در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲- معادلات حاکم

Flow-3D یکی از کاربردی‌ترین نرم‌افزارهایی است که با حل عددی معادله جریان سیال به روش CFD روی

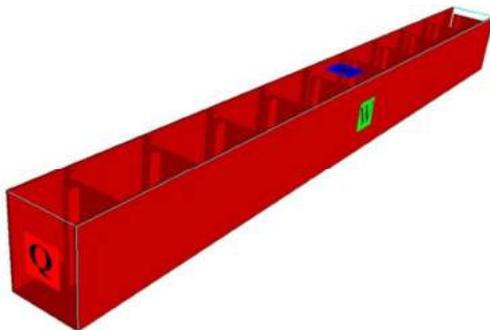
به منظور بررسی اثر پارامترهای تأثیرگذار بر جریان در راه‌ماهی، از آنالیز ابعادی استفاده گردیده است.

مؤلفه شتاب ثقل در جهت  $i$  ( $m/s^2$ ) و  $p$  فشار در هر نقطه از سیال (Pa) می‌باشد [۲۱].

جدول ۱- محدوده پارامترهای هندسی در سازه راه‌ماهی پیشنهادی

$Lb_1/Lb_2$	$W_0/B$	$\theta$ (درجه)
۵/۵	۰/۱۳۶	صفر
۳/۸۷۵	۰/۲۰۴	۹
۲/۹	۰/۲۷۲	۱۸

برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل آشفتگی و اندازه سلول‌های محاسباتی از سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE^9$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین قدرمطلق خطا ( $MAE^{10}$ ) استفاده گردیده است. این مقادیر با روابط (۴) تا (۶) بیان شده‌اند.



شکل ۳- شرایط مرزی در شبیه‌سازی راه‌ماهی در نرم‌افزار Flow-3D

هرچه مقدار  $RMSE$  و  $MAE$  به عدد صفر و مقدار  $R^2$  به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تطابق بیشتر بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{n}} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{\sum_{i=1}^n E^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n N^2}{n}\right)} \right] \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E - N| \quad (6)$$

با ملاحظه پارامترهای هیدرولیکی و زیست‌محیطی راه‌ماهی و استفاده از آنالیز ابعادی، با حذف پارامترهای کم‌اثر، مشاهده شد که پارامترهای مؤثر بر این تحقیق از رابطه (۳) پیروی می‌کنند:

$$\frac{TKE}{V^2} = f\left(\frac{V^2}{g \times y}, \theta, \frac{Lb_1}{W_0}, \frac{Lb_2}{Lb_1}, \frac{B}{W_0}\right) \quad (3)$$

که در آن،  $TKE$  انرژی آشفتگی،  $V$  سرعت جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $y$  عمق آب،  $\theta$  زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیوار حوضچه،  $Lb_1$  طول دیواره بزرگ،  $Lb_2$  طول دیواره کوچک،  $B$  عرض حوضچه و  $W_0$  بازشدگی ورودی و خروجی استخر می‌باشند.

### ۲-۳- مدل‌سازی عددی جریان در راه‌ماهی

در شکل ۳، هندسه راه‌ماهی مدل‌سازی شده به صورت کامل و شرایط مرزی مربوطه نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی جریان در مدل راه‌ماهی، از شرط مرزی ورودی دبی ( $Q$ ) برای سطح ورودی، از شرط مرزی دیوار ( $W$ ) برای سطح دیوارها و کف مدل، و شرط مرزی سطح ( $S$ ) برای  $Z_{max}$  استفاده شده است؛ چراکه تا وقتی که جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بی‌نهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۴- معیار ارزیابی دقت مدل‌سازی عددی

<sup>9</sup>- Root-Mean-Square Error

<sup>10</sup>- Mean Absolute Error

در روابط فوق،  $N_i$  و  $E_i$  به ترتیب داده‌های عددی و آزمایشگاهی و  $n$  تعداد کل داده‌ها است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحت‌سنجی

در مدل Flow-3D از مدل‌های آشفتگی مختلفی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. هدف اصلی هر مدل آشفتگی، ایجاد سازوکاری برای تخمین اثر نوسانات آشفتگی بر کمیت‌های متوسط جریان است. در مدل LES، تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شده و ساختارهای ریز تقریب زده می‌شوند. در مدل  $k-\epsilon$ ، مقیاس طول برخلاف مدل‌های یک معادله‌ای، بدون نیاز به روابط تجربی برآورد می‌شود، اما در مدل آشفتگی RNG برخلاف مدل  $k-\epsilon$  ضرایب موجود به روش تجربی محاسبه می‌گردند [۲۴].

در جدول ۲، شاخص‌های آماری  $R^2$ ، RMSE و MAE به منظور بررسی عملکرد مدل عددی، صحت‌سنجی آن برای مدل‌های آشفتگی، همچنین تعداد سلول‌های بهینه برای مدل‌سازی عددی و نتایج پروفیل‌های سرعت در سه راستای مختلف در نقاط مشخص شده در مدل آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. پس از حل میدان جریان سه‌بعدی به وسیله

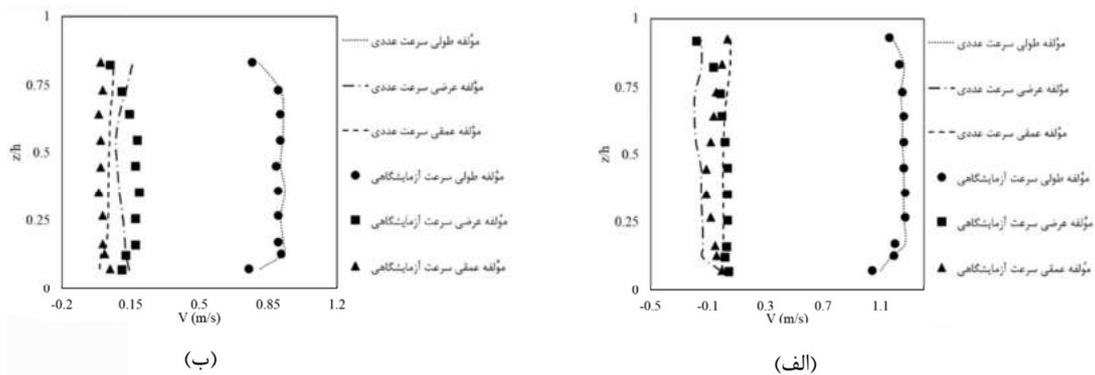
مدل‌های آشفتگی RNG، LES و  $k-\epsilon$  و با استفاده از شاخص‌های آماری ذکر شده، بین داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقدار متناظر آن در شبیه‌سازی عددی، مشخص گردید که مدل  $k-\epsilon$  نتایج مطلوب‌تری را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی نشان می‌دهد. مقدار  $R^2$  در مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  نسبت به مدل‌های آشفتگی RNG و LES همبستگی بیشتری را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی  $R^2$  مدل آشفتگی RNG نزدیک به مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  است، ولی چون مقدار RMSE و MAE مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  کمتر است، حاکی از دقت بیشتر آن نسبت به مدل RNG می‌باشد. سپس، با تغییر اندازه سلول شبکه حل، شبکه حل بهینه ارزیابی گردید که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. به دلیل چشم‌گیر نبودن اختلاف دقت سلول ریز با متوسط و مقرون به صرفه بودن شبکه حل متوسط در زمان و هزینه، شبکه حل با اندازه سلول متوسط انتخاب شد. ضمناً، به‌منظور مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، پروفیل قائم سرعت طولی جریان در دو نقطه‌ی  $V_1$  و  $V_4$  در سه راستای مختلف برای مدل آشفتگی و تعداد سلول‌های بهینه در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی برقرار شده است.

جدول ۲- مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی	$R^2$	RMSE	MAE
RNG	۰/۹۷۲	۰/۰۹۸	۰/۰۷۲
LES	۰/۹۳	۰/۱۱	۰/۰۹۵
$k-\epsilon$	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۰۵

جدول ۳- مقایسه دقت شبکه‌بندی‌های مورد استفاده

اندازه شبکه	تعداد سلول‌ها	$R^2$	RMSE	MAE
ریز	۱۱۶۰۰۰۰	۰/۹۸۸	۰/۰۹۸	۰/۰۶۸
متوسط	۸۵۰۰۰۰	۰/۹۷۸	۰/۰۸۳	۰/۰۷۳
درشت	۶۰۰۰۰۰	۰/۹۴	۰/۰۸۵	۰/۰۵۴



شکل ۴- مقایسه پروفیل قائم سرعت استخراج شده از نرم‌افزار و مدل آزمایشگاهی، (الف)  $V_1$  و (ب)  $V_4$

### ۳-۲- تحلیل سرعت

تغییرات پروفیل سرعت در عمق، روی عبور ماهیان از داخل راه‌ماهی تأثیرگذار است و از معیارهای مهم در طراحی ماهی‌رو می‌باشد. شکل ۵، مقادیر محاسبه شده سرعت عمقی در حوضچه میانی سازه راه‌ماهی را نشان می‌دهد. همچنین، این مؤلفه در خط میانی حوضچه‌ها نشان داده شده است. در این ناحیه، مقادیر سرعت از بخش‌های دیگر استخر بیشتر بوده و ناحیه بحرانی برای عبور ماهی می‌باشد. هرچه سرعت در این محور کمتر باشد، عبور ماهی آسان‌تر است. در این شکل، پروفیل سرعت در استخر با توجه به پارامترهای  $Lb_1/Lb_2$  و  $\theta$  قابل مشاهده می‌باشد. به منظور بی‌بعد نمودن سرعت، سرعت در هر نقطه از استخر به سرعت بیشینه استخر تقسیم شده است. سرعت در پایین‌ترین تراز استخر صفر است. با فاصله گرفتن جریان از کف، سرعت به مقدار بیشینه خود رسیده و در ادامه، با افزایش ارتفاع، از مقدار سرعت کاسته شده است. با توجه به شکل ۵، در مدل‌های مختلف، به دلیل تغییر هندسه حوضچه‌ها، پروفیل‌های سرعت متفاوتی به دست آمده است. با توجه به درصد تغییرات مؤلفه طولی سرعت مشاهده می‌شود که پارامتر  $Lb_1/Lb_2 = 5/5$  تمام نمودارها بیشترین سرعت و پارامتر  $Lb_1/Lb_2 = 3/875$  کمترین سرعت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش مقدار پارامتر  $W_0$ ، سرعت کاهش یافته است. در تمامی مدل‌ها، میانگین درصد کاهش سرعت از مدل  $Lb_1/Lb_2 = 5/5$  به مدل‌های

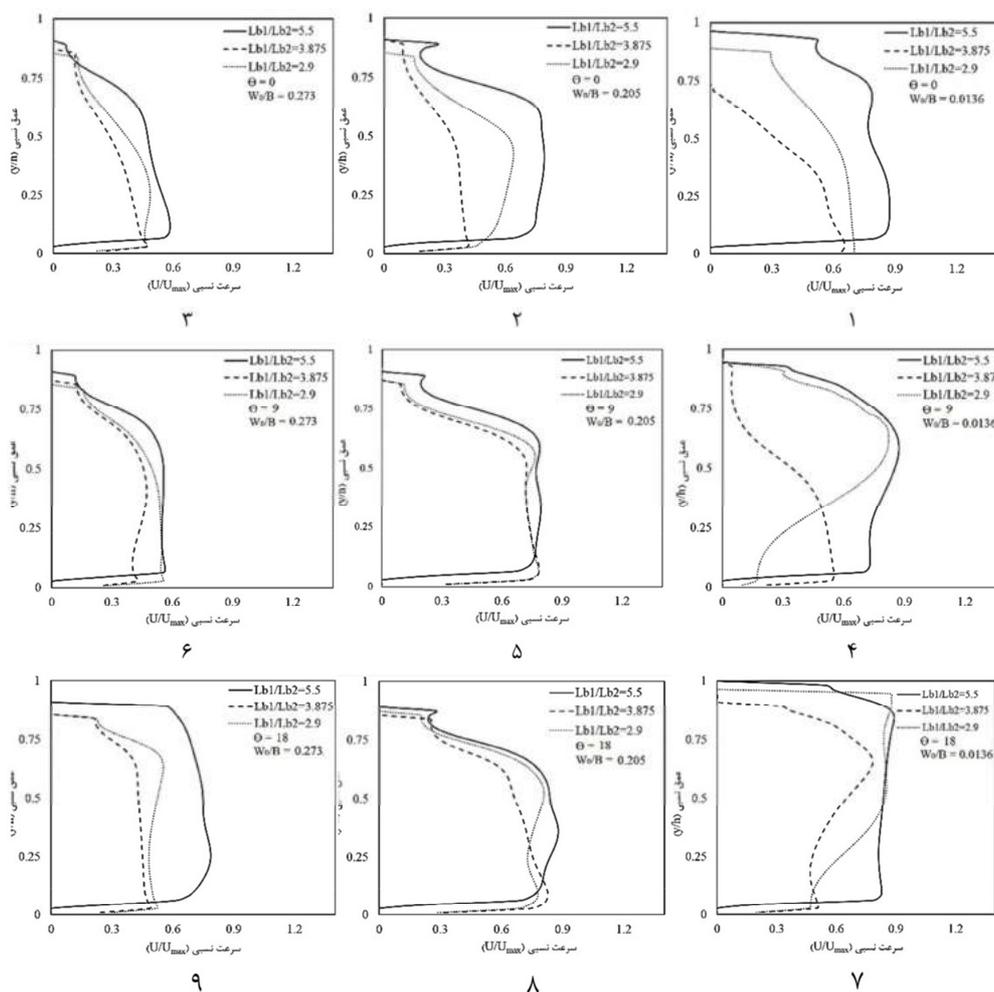
در تمامی  $\theta$  ها به ترتیب  $28/4$ ،  $19/7$  و  $27/23$  بوده است. با تحلیل و بررسی دقیق‌تر مشاهده می‌شود که درصد کاهش سرعت در  $\theta = 0$  و  $\theta = 18$  بیشتر است.

### ۳-۳- تحلیل حجم ناحیه استراحت ماهیان

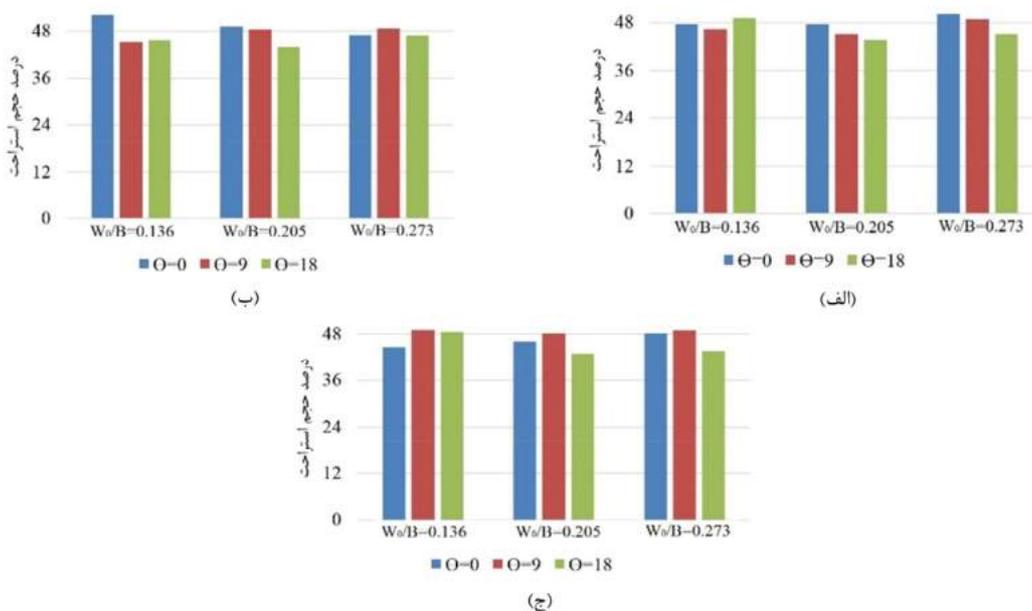
در سازه راه‌ماهی، نواحی با سرعت کم جریان برای استراحت ماهیان اختصاص می‌یابد. طبق نظر محققان در ناحیه استراحت، سرعت جریان باید از  $0/3$  متر بر ثانیه کمتر باشد [۲۲]. یکی از معیارهای مقایسه سازه‌های راه‌ماهی، تعیین حجم ناحیه استراحت ماهیان می‌باشد. برای دست یافتن به این پارامتر، تعداد سلول‌هایی که سرعت در آن کمتر از  $0/3$  متر بر ثانیه می‌باشد؛ تعیین گردیده است، سپس این تعداد سلول تقسیم بر کل سلول‌های داخل حوضچه شده است. سلول‌هایی با سرعت صفر که در مجاورت دیوارها می‌باشند در محاسبه ناحیه استراحت منظور نگردیده‌اند.

در نمودارهای میله‌ای ارائه شده در شکل ۶، برای دو پارامتر  $Lb_1/Lb_2$  و  $\theta$ ، درصد حجم استراحت مقایسه گردیده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است، با افزایش  $\theta$  از صفر به ۹ و از ۹ به ۱۸ درجه، میانگین درصد حجم استراحت به صورت میانگین  $3/3$  افزایش می‌یابد. این مقادیر حجم به صورت متوسط از ۴۳ تا ۵۳ درصد در مدل‌های مختلف تغییر کرده است. با مقایسه نمودارها در این شکل، مشخص گردید که تأثیر  $\theta$

نسبت به  $Lb_1/Lb_2$  بر حجم ناحیه استراحت ماهیان بیشتر می‌باشد.



شکل ۵- مؤلفه طولی سرعت در عمق راهماهی با هندسه‌های مختلف

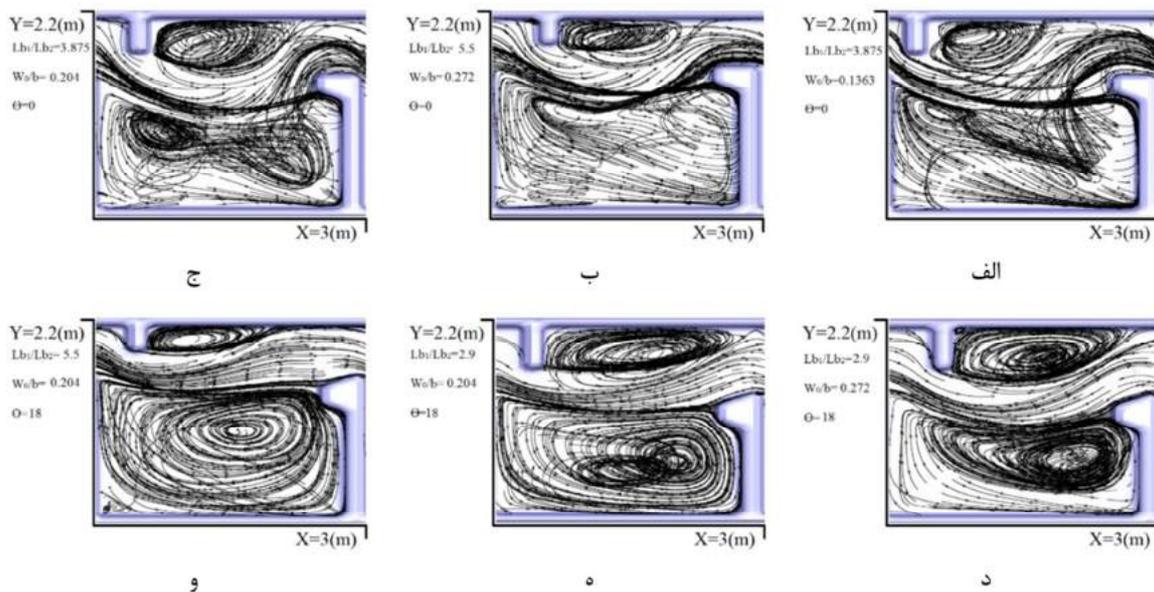


شکل ۶- بررسی اثر نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک بر حجم استراحت ماهیان، (الف)  $Lb_1/Lb_2 = 5/5$ ،

(ب)  $Lb_1/Lb_2 = 3/875$  و (ج)  $Lb_1/Lb_2 = 2/9$

هرچه خطوط جریان در حوضچه‌ها نامنظم‌تر باشد، نواحی استراحت بیشتری تشکیل می‌شود و این امر برای سهولت در مهاجرت ماهی‌ها امری مفید است. طبق تحقیقات انجام گرفته توسط پژوهشگران، محدوده‌های با جریان دورانی توسط جریان‌های اصلی و مستقیم عبوری از یکدیگر جدا می‌گردند [۲۵]. محدوده با جریان دورانی، فضای مناسبی برای استراحت ماهی‌ها می‌باشد. این فضا هرچقدر بیشتر باشد، امکان استراحت برای ماهی‌ها فراهم‌تر است. بنابراین، در شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج توسعه این فضا و کاهش مسیر اصلی موجب فراهم شدن فضای بیشتر برای ماهی‌ها می‌گردد. در حالی که در شکل‌های ۷-د تا ۷-و محدوده‌های جریان دورانی فضای کمتری در مسیرهای عبور جریان در سلول‌ها دارند.

در شکل ۷، به منظور بررسی خطوط جریان در حوضچه، نسبت به ترسیم الگوی جریان در میانه عمق  $z/h = 0.5$  سه نمونه با بیشترین حجم استراحت و سه نمونه با کمترین حجم استراحت اقدام گردید. در شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج خطوط جریان برای بیشترین نسبت حجم ارائه شده است. نواحی با سرعت کمتر از  $0.3$  متر بر ثانیه، مساحت بیشتری را نسبت به شکل‌های ۷-د تا ۷-و دارند. به عبارتی، محدوده الگوی پر سرعت در شکل‌های ۷-د تا ۷-و و که خطوط جریان داخل حوضچه بسته شده‌اند، مساحت بیشتری نسبت به شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج دارند. به عبارت دیگر، با افزایش محیط‌هایی با سرعتی کمتر از  $0.3$  متر، نواحی برای استراحت ماهیان ایجاد می‌شود. با بررسی انجام شده مشخص گردید که



شکل ۷- بررسی نواحی دورانی جریان در حوضچه استراحت ماهیان

### ۳-۴- تحلیل انرژی آشفتگی

انرژی آشفتگی وابسته به مؤلفه‌های سرعت نوسانی است [۹]:

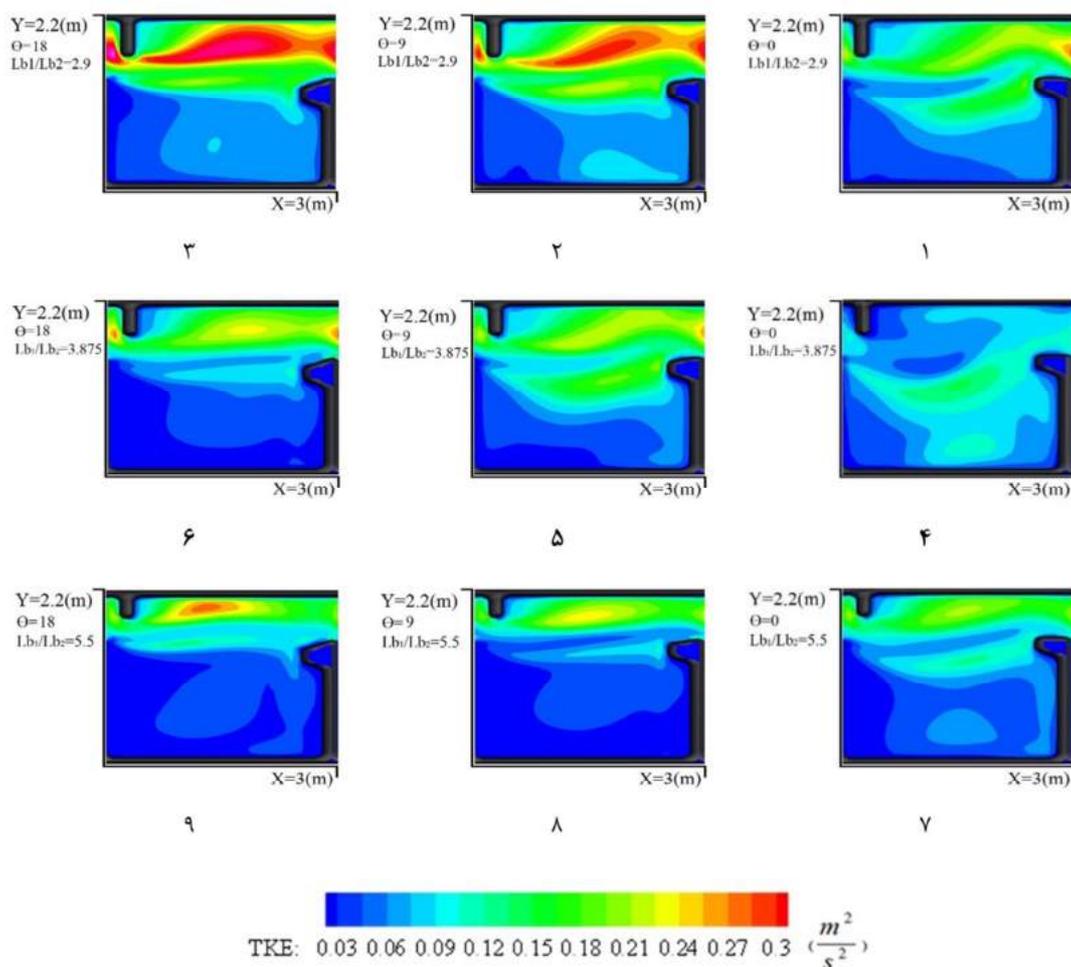
$$TKE = \frac{1}{2} (V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2) \quad (7)$$

تأثیر پارامتر  $\theta$  بر انرژی آشفتگی چشم‌گیر بوده است. به طوری که با افزایش زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیوار حوضچه، انرژی آشفتگی به‌طور متوسط ۳۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش

انرژی آشفتگی از دیگر پارامترهای مهم در طراحی سازه راه‌ماهی می‌باشد. آشفتگی در جریان می‌تواند به ماهی‌ها کمک نماید که با جذب شدن به سمت آشفتگی در مسیر جریان برای حرکت به سمت حوضچه بعدی قرار گیرند. مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که انرژی آشفتگی می‌تواند در عبور موفقیت‌آمیز ماهی از طریق سازه راه‌ماهی نقش مهمی را داشته باشد. طبق رابطه (۷)،

بیشتری را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه  $\theta$ ، محدوده‌های دارای آشفتگی حداکثر در مسیر عبوری جریان در مجاورت دیواره‌های کوچک و بزرگ افزایش می‌یابد. همچنین، برای یک  $\theta$  مشخص و تغییرات  $Lb_1/Lb_2$  می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش این مقدار، محدوده‌های جریان با آشفتگی‌های بیشینه کاهش می‌یابند.

نسبت  $Lb_1/Lb_2$ ، انرژی آشفتگی به طور متوسط  $9/82$  درصد افزایش نسبی داشته است. شکل ۸، انرژی آشفتگی ۹ مدل تحلیلی راهماهی در یک  $W_0$  ثابت را نشان می‌دهد. همانگونه که در تمام بخش‌های این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش  $\theta$ ، انرژی آشفتگی افزایش می‌یابد، چون جریان آب عبوری از ورودی حوضچه به سمت دیواره حوضچه هدایت می‌شود، آشفتگی در آن قسمت متراکم‌تر شده و مقدار عددی



شکل ۸- آشفتگی جریان در حوضچه راهماهی

#### ۴- نتیجه‌گیری

دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه ( $\theta$ )، بازشدگی ورودی و خروجی حوضچه ( $W_0$ ) و نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک ( $Lb_1/Lb_2$ ) در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

در تحقیق حاضر، راهماهی با بازشدگی قائم با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۴] نیز برای صحت‌سنجی و مقایسه تغییرات مشخصه‌های جریان در مدل عددی تحقیق حاضر استفاده شد. زاویه انتهایی

دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه، این انرژی به طور متوسط ۳۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. ۵- به طور کلی، تغییرات نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک، سرعت آب در راه‌ماهی را کاهش داده و می‌تواند روند حرکت ماهی‌ها را به بالادست آسان‌تر کند. همچنین، حجم محیط استراحت و انرژی آشفتگی با افزایش زاویه انتهایی دیواره نسبت به دیواره حوضچه افزایش می‌یابند.

این تحقیق برای راه‌ماهی نوع بازشدگی قائم صورت گرفته و نرم‌افزار Flow-3D به‌خوبی توانسته جریان را در این سازه مدل‌سازی نماید. لذا پیشنهاد می‌گردد عملکرد این نرم‌افزار برای مدل‌سازی انواع دیگر راه‌ماهی‌ها از جمله راه‌ماهی استخر- سرریزی و یا دنیل استفاده گردد. در این تحقیق، تغییرات هندسی در حوضچه بررسی گردیده است. پیشنهاد می‌گردد عملکرد حوضچه تحت شرایط مختلف هیدرولیکی تغییرات دبی، عدد فرود و شیب بستر مورد بررسی قرار گیرد.

۱- بهترین مدل آشفتگی در این پژوهش، با توجه به مش بهینه، مدل  $k-\epsilon$  بوده است. مقادیر شاخص‌های آماری برای این مدل  $R^2 = 0.98$ ،  $RMSE = 0.08$  و  $MAE = 0.05$  به‌دست آمده است.

۲- مؤلفه طولی سرعت در عمق راه‌ماهی با کاهش نسبت  $Lb_1/Lb_2$  به طور متوسط ۲۵/۱۱ درصد کاهش داشته است.

۳- بررسی‌های انجام شده در حجم استراحت حوضچه نشان داد که با افزایش پارامتر  $\theta$ ، حجم ناحیه استراحت ۳/۶ درصد افزایش داشته است و تغییرات این پارامتر با تغییر  $Lb_1/Lb_2$  بین ۵ تا ۸ درصد بوده است. لازم به ذکر است که در حوضچه‌ها، با تشکیل جریان دورانی، محیطی ایمن برای استراحت ماهیان فراهم می‌شود.

۴- انرژی آشفتگی یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی راه‌ماهی است که با افزایش نسبت  $Lb_1/Lb_2$ ، به طور متوسط ۹/۸۲ درصد افزایش داشته است. همچنین، با افزایش زاویه انتهایی

## مراجع

- [1] Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1984). "Hydraulics of Denil fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), 1219-1233
- [2] Wu, S., Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1999). "Structure of flow in vertical slot fishway", *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 351-360.
- [3] Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Lodewyk, S. (1991). "Hydraulics of culvert fishways IV: Spoiler baffle culvert fishways", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(1), 76-82.
- [4] Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Flint-Petersen, L. (1987). "Hydraulics of two-level Denil fishway", *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(5), 670-674.
- [5] Liu, M., Rajaratnam, N., & Zhu, D. Z. (2006). "Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), 765-777.
- [6] Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., & Balairón, L. (2010). "Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways", *Ecological Engineering*, 36(10), 1355-1364.
- [7] Tarrade, L., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2008). "Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways", *Hydrobiologia*, 609(1), 177.
- [8] Tarrade, L., Pineau, G., Calluau, D., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2011). "Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways", *Environmental Fluid Mechanics*, 11(1), 1-21.
- [9] Marriner, B. A., Baki, A. B. M., Zhu, D. Z., Thiem, J. D., Cooke, S. J., & Katopodis, C. (2014). "Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway", *Ecological Engineering*, 63, 88-101.
- [10] Bombáč, M., Novak, G., Mlačnik, J., & Četina, M. (2015). "Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations", *Ecological Engineering*, 84, 476-484.

- [11] An, R., Li, J., Liang, R., & Tuo, Y. (2016). "Three-dimensional simulation and experimental study for optimising a vertical slot fishway", *Journal of Hydro-environment Research*, 12, 119-129.
- [12] Kim, S., Yu, K., Yoon, B., & Lim, Y. (2012). "A numerical study on hydraulic characteristics in the ice Harbor-type fishway", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(2), 265-272.
- [13] Puertas, J., Pena, L., & Teijeiro, T. (2004). "Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1), 10-23.
- [14] Bombač, M., Četina, M., & Novak, G. (2017). "Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization", *Ecological Engineering*, 107, 126-136.
- [15] Bravo-Córdoba, F. J., Sanz-Ronda, F. J., Ruiz-Legazpi, J., Valbuena-Castro, J., & Makrakis, S. (2018). "Vertical slot versus submerged notch with bottom orifice: Looking for the best technical fishway type for Mediterranean barbels", *Ecological Engineering*, 122, 120-125.
- [16] Fuentes-Pérez, J. F., Silva, A. T., Tuhtan, J. A., García-Vega, A., Carbonell-Baeza, R., Musall, M., & Kruusmaa, M. (2018). "3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways", *Environmental modelling & software*, 99, 156-169.
- [17] Quaranta, E., Katopodis, C., & Comoglio, C. (2019). "Effects of bed slope on the flow field of vertical slot fishways", *River Research and Applications*.
- [18] Ehsani, R., Hassanzadeh, Y., Mojtahedi, A., Sanei, M., & Hedayati, H. (2018). "Experimental study of canoe-fishway hydraulic conditions", *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(4), 61-75.
- [19] Baharvand, S., & Lashkar-Ara, B. (2019). "Determining the effectiveness of resting pool area in vertical slot fishways type 1 to pass chinook salmon", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), 1-12.
- [20] Badri, S. S., Ayyoubzadeh, S. A., & Yasi, M. (2019). "Nature-like fishway design and evaluation of its performance with habitat simulation model of PHABSIM", *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), 1-13.
- [21] Smith, H. D. (2004). Modeling the flow and scour around an immovable cylinder, Doctoral dissertation, Ohio State University, USA.
- [22] Quaranta, E., Katopodis, C., Revelli, R., & Comoglio, C. (2017). "Turbulent flow field comparison and related suitability for fish passage of a standard and a simplified low gradient vertical slot fishway", *River Research and Applications*, 33(8), 1295-1305.
- [23] Chorda, J., Maubourguet, M. M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., & David, L. (2010). "Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), 141-151.
- [24] Ghasemzadeh, F. (2013). Simulation of hydraulic problems in flow-3D. 2<sup>nd</sup> ed., Noavar Publ., Tehran, Iran.
- [25] Yagci, O. (2017). "Hydraulic aspects of pool-weir fishways as ecologically friendly water structure", *Ecological Engineering*, 36, 36-46.

## شیوه‌نامه ارائه مقاله برای مجله پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست

گزارش پیش‌رو الگو و شیوه‌نامه‌ی تدوین مقالات در مجله «پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست» می‌باشد که به‌منظور استفاده‌ی محققان در ارائه‌ی یک نگارش حرفه‌ای تهیه شده است. این شیوه‌نامه حاوی مطالبی در ارتباط با نحوه‌ی نگارش و ساختار تهیه مقاله برای این مجله است. همچنین تمامی سبک‌های مورد نیاز برای قسمت‌های مختلف مقاله را داراست و از این‌رو آماده استفاده توسط مؤلفین می‌باشد. از نویسندگان محترم درخواست می‌شود این شیوه‌نامه را در هنگام تهیه مقاله به دقت رعایت فرمایند و مسئولین مجله را در راستای ارتقای کیفیت یاری نمایند. متن چکیده باید در یک پاراگراف و حداکثر ۲۵۰ کلمه به‌طور صریح موضوع، روش تحقیق، نتایج مهم به‌دست آمده و روش ارزیابی را مطرح کند. در متن چکیده از اشاره به تاریخچه، توصیف تکنیک‌ها، فصل‌بندی، ذکر منابع و آوردن فرمول‌ها، نمودارها و جداول خودداری گردد.

**واژگان کلیدی:** مقاله، نویسنده، فرمول، شکل، جدول، نتیجه‌گیری. (کلمات کلیدی، راهنمای نکات مهم موجود در مقاله می‌باشد و ماهیت، محتوا و گرایش آن را به‌وضوح روشن می‌سازد. تعداد کلمات یا عبارات کلیدی حداقل ۴ و حداکثر ۶ کلمه می‌باشد که با استفاده از ویرگول (،) از یکدیگر جدا می‌شوند).

داخل همین نمونه، کامل شود چراکه این نمونه بر اساس سبک مورد نظر مجله تهیه شده است. در عین حال سبک نگارشی که در این مقاله باید استفاده شود در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، تمام قلم‌های مورد استفاده در موقعیت‌های مختلف به همراه اندازه آنها ارائه شده است. هنگام کپی کردن متن از سند دیگر به داخل این سند حتماً از گزینه کپی فرمت<sup>۲</sup> برای جلوگیری از تغییر فرمت‌ها استفاده شود.

### ۲- نحوه ارائه مطالب در مقاله

مقالات ارسالی باید شامل بخش‌های زیر باشد:

## نام و نام خانوادگی

### نویسنده اول\*

دانشکده، دانشگاه.

(نمونه اول):

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

cer@qom.ac.ir

## نام و نام خانوادگی

### نویسنده دوم

دانشکده، دانشگاه.

(نمونه دوم):

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

### ۱- مقدمه

هدف اساسی از تدوین این شیوه‌نامه، دستیابی به الگویی جامع و حرکت به سمت استاندارد نمودن چهارچوب تدوین مقالات برای مجله «پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست» می‌باشد. از این‌رو، نحوه‌ی نگارش حرفه‌ای یک گزارش علمی و ساختار مورد نیاز آن به تفصیل ارائه می‌گردد.

این شیوه‌نامه براساس برخی از قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار مایکروسافت ورد<sup>۱</sup> ۲۰۰۷ یا ۲۰۱۰ تهیه شده است. برای نگارش مقاله، توصیه می‌شود متن مقاله از ابتدا

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۰۰/۰۰/۰۰، بازنگری ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش ۰۰/۰۰/۰۰.

(DOI): 10.22091/cer.0000.0000.0000 شناسه دیجیتال

<sup>2</sup>- Format Painter

<sup>1</sup>- Microsoft-Word

- عنوان کامل مقاله به لاتین، نام نویسنده (یا نویسندگان) به زبان انگلیسی، مشخصات نویسنده (نویسندگان) مطابق با جزئیات فارسی آن به لاتین بیان شود.
- چکیده انگلیسی، کلید واژگان انگلیسی (کاملاً منطبق با چکیده و واژگان کلیدی فارسی).

## ۲-۱- صفحه‌بندی

مقاله به صورت دو ستونی (اندازه هر ستون ۷/۳۲ سانتیمتر و فاصله بین دو ستون ۱/۲۷ سانتیمتر) آماده شود. فاصله بین خطوط (به جز بخش چکیده) ۱/۱۵ Multiple تنظیم شود. کاغذ مورد استفاده باید A4 بوده و تمامی حاشیه‌های آن در اندازه ۲/۵۴ سانتیمتر تنظیم شوند.

تورفتگی ابتدای هر پاراگراف به اندازه ۰/۸ سانتیمتر تعیین شود (به جز متن چکیده، عناوین اصلی و فرعی). جداول، شکل‌ها و عناوین آنها به صورت وسط‌چین و متن مقاله به صورت تراز دوطرفه<sup>۳</sup> تنظیم شود.

شماره‌گذاری عنوان‌ها از ۱ الی آخر صورت گرفته و مقدمه شماره ۱ را به خود اختصاص دهد. شماره‌گذاری زیر عنوان‌ها فرضاً در بخش ۲ به صورت ۱-۲ و ۲-۲ بوده و در سایر بخش‌ها نیز به همین ترتیب ادامه پیدا کند. بخش مراجع و قدردانی (در صورت لزوم) دارای شماره نمی‌باشد.

تنظیم فاصله عناوین هر بخش و زیر بخش مربوطه به صورت شکل‌های ۱ و ۲ می‌باشد.

## ۲-۲- نکات کلی در نحوه بیان متن

در ارائه‌ی متون علمی، رعایت نکات زیر الزامی است:

- ۱- از آوردن جملات غیرحرفه‌ای، محاوره‌ای و ناقص خودداری شود.

- عنوان کامل مقاله به فارسی، چکیده فارسی (حداکثر ۱۵۰ کلمه)، واژگان کلیدی (حداکثر ۱۰ واژه).
- نام نویسنده (یا نویسندگان)، پست الکترونیکی نویسنده (نویسندگان). نام نویسنده عهده‌دار مکاتبات با ستاره مشخص شود.

## جدول ۱- اندازه و قلم‌های مورد استفاده در مقاله

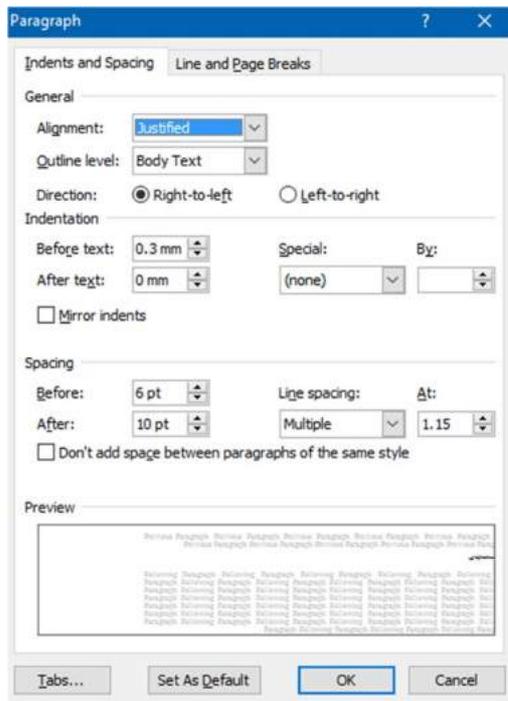
موقعیت استفاده	نوع قلم	اندازه	Bold
عنوان مقاله	B Titr	۱۴	√
نام نویسنده (گان)	B Nazanin	۱۳	√
مرتبه نویسنده (گان)	B Nazanin	۱۱	
ایمیل نویسنده (گان)	Times New Roman	۱۰	
متن چکیده	B Nazanin	۱۱	
واژگان کلیدی	B Nazanin	۱۱	
عنوان بخش	B Nazanin	۱۳	√
عنوان زیربخش	B Nazanin	۱۱	√
متن اصلی مقاله	B Nazanin	۱۲	
زیرنویس شکل	B Nazanin	۱۱	
بالانویس جدول	B Nazanin	۱۱	
پانویس	Times New Roman	۹	
منابع فارسی	B Nazanin	۱۰	
منابع لاتین	Times New Roman	۱۰	
عنوان انگلیسی	Times New Roman	۱۴	√
نام نویسنده (گان)- انگلیسی	Times New Roman	۱۲	√
مرتبه نویسنده (گان)- انگلیسی	Times New Roman	۱۱	
چکیده لاتین	Times New Roman	۱۱	
واژگان کلیدی- لاتین	Times New Roman	۱۱	

- مشخصات نویسنده (نویسندگان) به صورتی که در ابتدای این شیوه نامه آورده شده است بیان شود.
- مقدمه، بدنه مقاله (شامل شرح مسأله، روش حل، تفسیر، تحلیل نتایج)، نتیجه‌گیری، فهرست مراجع.

<sup>3</sup>- Justify

شود. نوشتن مطالب ارزشمندی که هیچ ربطی به موضوع ندارد، فاقد ارزش علمی است.

۹- سعی شود تا در حد امکان از کلمات فارسی به جای کلمات غیرفارسی آنها استفاده شود. به عنوان مثال، استفاده از کلمه «لذا» به جای «بنابراین» و یا کلمه «پروسس» به جای «پردازش» مناسب نیست.



شکل ۲- تنظیمات فاصله عنوان زیربخش در متن

۱۰- همچنین در نوشته‌های فارسی باید در حد امکان از همزه «ء، اُ، وُ، هُ، اِ، عِ» استفاده نشود. مثلاً «اجزاء هواپیما» و «آئین‌نامه» ناصحیح، اما «اجزای هواپیما» و «آیین‌نامه» صحیح هستند.

۱۱- کلیدی اصطلاحات در اولین کاربرد نیاز به پاورقی دارند.

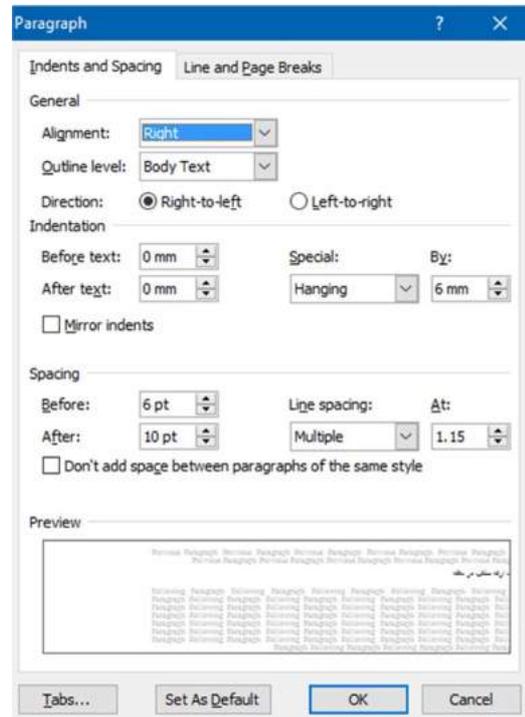
۱۲- تمامی تعاریف به صورت دقیق، با مرجع‌نگاری دقیق بیان شوند.

۱۳- نوآوری پژوهش به صورت کاملاً مجزا و صریح در انتهای بخش مقدمه ارائه شود.

۱۴- کلیدی علایم مانند نقطه، کاما و دونقطه باید به

۲- افعال در یک بند با یکدیگر هماهنگ باشند، به نحوی که در جملات پی‌درپی بین افعال مجهول و معلوم تعویض صورت نگیرد.

۳- از به کار بردن فعل‌های یکسان در جملات پشت سر هم خودداری شود.



شکل ۱- تنظیمات فاصله عنوان بخش در متن

۴- از آوردن جملات تکراری (حتی به لحاظ مفهومی) خودداری شود.

۵- لغت «ما» و افعال اول شخص تنها در صورت نیاز ضروری و برای بیان نوآوری به کار رود. در سایر موارد، جملات به صورت سوم شخص ارائه شوند.

۶- متن ارائه شده پیوستگی مفهومی داشته باشد و مطالب یک موضوع به طور متمرکز تنها و تنها در یک زیربخش آورده شود.

۷- در تنظیم و ارتباط بندها (پاراگراف‌ها) با یکدیگر دقت شود. در صورت طولانی شدن هر بند، ممکن است خواننده خسته و سردرگم شود.

۸- یک مقاله علمی باید در حد امکان، مختصر و مفید باشد و از بحث‌های غیر ضروری در آن پرهیز

و «شکلها» و «شکل‌ها» نادرست و «می‌باشد» و «شکل‌ها» درست می‌باشد. نویسندگان می‌توانند برای اطلاع از نحوه صحیح نگارش کلمات از فایل فرهنگ املائی خط فارسی در سایت فرهنگستان زبان و ادب فارسی استفاده کنند.

### ۲-۳- روابط ریاضی و فرمول‌ها

برای نگارش فرمول‌های ریاضی می‌توان از نرم‌افزار MathType استفاده کرد. تمامی نمادهای مورد نیاز در این نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. برای استفاده از سبک معرفی شده در نوشتن روابط ریاضی و فرمول‌ها لازم است جدول زیر را در محل تایپ فرمول کپی کرده و در قسمت سمت چپ جدول به نوشتن فرمول اقدام نمود.

$$m \ddot{x} + c \dot{x} - kx = P_0 \sin \omega t \quad (1)$$

در تنظیم قلم و سبک روابط ریاضی از الگوی ارائه شده در جدول ۲ پیروی می‌شود.

جدول ۲- قلم و سبک روابط ریاضی

مورد کاربرد	سبک	قلم	Bold	Italic	مثال
Variable	Variable	Times New Roman		✓	$x$
Function	Function	Times New Roman		✓	$f(x)$
L.C.Greek	L.C.Greek	Symbol		✓	$\alpha$
U.C.Greek	U.C.Greek	Symbol			$\Omega$
Matrix-Vector	Matrix-Vector	Times New Roman	✓		$\mathbf{Ax} + \mathbf{bu}$
Number	Number	Times New Roman			12
Text	Text	Times New Roman			if $a > 1$
Constant Parameter	Text	Times New Roman			$E = mc^2$
Unit	Text	Times New Roman			$5 \text{ N/m}^2$
Math Operator	Text	Symbol			$\int x dx$
Math Function	Text	Times New Roman			$\sin x$

سیگما نباید ایتالیک باشد.

۲- کلیه متغیرهای استفاده شده در فرمول‌ها برای اولین بار، قبل یا بعد از معادله تعریف شوند.

کلمه‌ی قبل چسبیده و با کلمه‌ی بعد، تنها یک فاصله داشته باشند.

۱۵- همواره پرانتز باز، گیومه باز و کوتیشن باز از کلمه‌ی قبل یک فاصله داشته و به کلمه‌ی بعد چسبیده باشد. همچنین می‌بایست پرانتز بسته، گیومه بسته و کوتیشن بسته به کلمه‌ی قبل چسبیده و از کلمه‌ی بعد یک فاصله داشته باشد.

۱۶- اعداد تکرریمی در متن باید به صورت حروفی نوشته شوند.

۱۷- در بیان اعداد اعشاری فارسی از علامت «/» و در اعداد انگلیسی از «.» استفاده شود. (مثال: ۲/۴ و 2.4)

۱۸- از شروع کردن جملات با عدد، عبارت و نمادهای ریاضی پرهیز شود.

۱۹- هرگز از «...» در متن استفاده نشود. واژه‌ی «غیره» در این حالت، جایگزین مناسبی است.

۲۰- رعایت فاصله‌ها و نیم فاصله‌ها در متن ضروری می‌باشد. به عنوان مثال نگارش کلمه «میباشد»

به‌علاوه رعایت نکات زیر در نوشتن روابط ریاضی و فرمول‌ها الزامی است:

۱- در روابط ریاضی علامت‌های پرانتز، انتگرال و یا

خودداری و معادل مناسب فارسی آنها جایگزین گردد.

۳- در اولین کاربرد عبارات مخفف، بلافاصله پس از عبارت مورد نظر، عبارت انگلیسی آن در پرانتز می‌آید و سپس شماره‌ی پانویس داده می‌شود به عنوان مثال خوشه‌بندی فازی سی‌مین (FCM<sup>۴</sup>). سپس می‌توان از مخفف FCM در متن استفاده نمود.

۴- حرف اول لغات انگلیسی در پانویس باید با حروف بزرگ نوشته شود. همچنین در معادل انگلیسی یک عبارت در پاورقی، تنها حرف اول اولین کلمه به صورت بزرگ نوشته می‌شود.

۵- در مواردی مانند اسامی افراد که امکان یافتن معادل فارسی برای آنها وجود ندارد، باید نام انگلیسی در متن به خط فارسی و در پانویس به انگلیسی نوشته شود. به عنوان مثال ذکر اسامی خاص در صورت لزوم این‌گونه بیان می‌شود: بزدک<sup>۵</sup>.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نکات مهم در تحقیق انجام شده به طور خلاصه مرور و نتایج برگرفته از آن تشریح می‌شود. بخش نتیجه می‌تواند به کاربردهای تحقیق انجام شده اشاره کند، نکات مبهم و قابل تحقیق جدید را مطرح کند و یا پیشنهادهایی برای انجام تحقیقات آتی ارائه دهد.

#### ۳-۱- جداول و شکل‌ها

تمامی شکل‌ها شامل تصویرها، نمودارها و منحنی‌ها و همچنین جداول‌ها باید با کیفیت مناسب تهیه شوند، به گونه‌ای که کپی تهیه شده از آنها از وضوح کافی برخوردار باشد.

۳- هر معادله به یک جمله‌ی معرفی‌کننده قبل از معادله نیاز دارد که به «:» ختم شود. به عنوان مثال، معادله زیر تابع هدف را بیان می‌کند:

۴- دقت شود که به منظور حفظ منطق محاسبات ریاضی، برخلاف شکل‌ها، به شماره‌ی فرمول قبل از محل قرارگیری آن در متن، اشاره نشده باشد.

۵- محاسبات ریاضی می‌بایست با یک توضیح بیانی با اشاره به شماره‌ی معادلات یا قضایا همراه باشد.

۶- تمامی معادلات و نامعادلات که در خطوط جداگانه نگاشته شده‌اند، اگرچه از شماره‌ی آنها در داخل متن گزارش استفاده نشود، باید داخل جدول ارائه و دارای شماره‌ی معادله باشند. این کار به منظور سهولت مرجع‌دهی داوران لازم است.

۷- از به کارگیری علامت تساوی (=) بیش از یک بار در یک خط از معادله خودداری شود.

۸- در مواردی که فرمول در بیش از یک خط نوشته می‌شود، لازم است شماره‌ی فرمول در مقابل آخرین خط نوشته شود.

۹- فاصله بین فرمول‌ها و نیز فاصله یک فرمول از سطر بالا و پایین متن، بسته به نوع فرمول به صورت مناسب انتخاب شود، به صورتی که خطوط، متراکم و یا با فاصله زیاد به نظر نرسند.

#### ۲-۴- توضیحات در پانویس

توضیحات اضافه در ارتباط با یک عبارت یا واژه در صورت لزوم را می‌توان به صورت پانویس در همان صفحه آورد. رعایت موارد زیر در ارتباط با پانویسی عبارات، الزامی است:

۱- از پانویسی در عناوین بخش‌ها و زیربخش‌ها خودداری شود و پانویسی در اولین کاربرد واژه‌ی مربوطه در متن انجام گیرد.

۲- به استثنای عبارات مخفف، لغات انگلیسی تنها در پانویس آورده شود و از به کارگیری آنها در متن

<sup>۴</sup>- Fuzzy C-Means Clustering

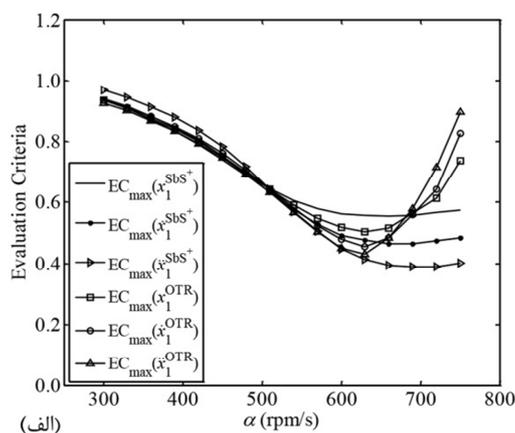
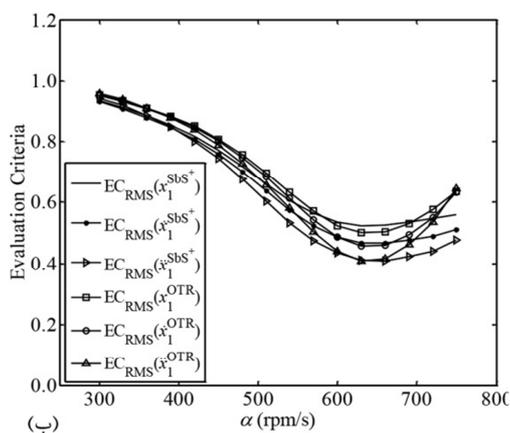
<sup>۵</sup>- Bezdek

ناقص و بدون فعل باشد و توضیحات اضافی در ارتباط با شکل در متن آورده شود.

۶- در متن ویژگی‌های تمامی شکل‌ها، تمامی متغیرها و نمادهای موجود در آنها توضیح مبسوط داده شود.

۷- شکل‌هایی که متشکل از چند قسمت هستند با زیرعنوان (الف) و (ب) در پایین شکل مشخص شوند و در عنوان زیر شکل، توضیحی برای هر یک از آنها با ذکر زیرعنوان مربوطه آورده شود.

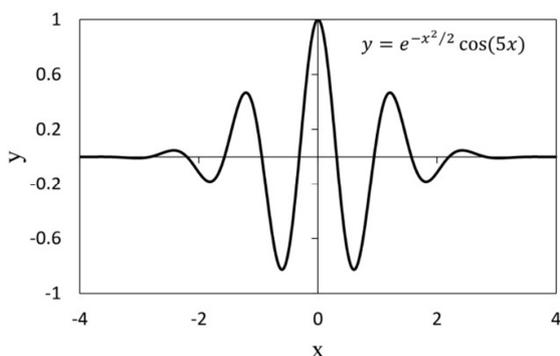
۸- شکل‌هایی که دارای یک عنوان هستند، با استفاده از نرم‌افزار فوتوشاپ در یک صفحه قرار داده شوند. به‌عنوان نمونه، به شکل ۳ توجه شود.



شکل ۳- معیارهای ارزیابی پاسخ سیستم اصلی بر حسب  $\alpha$  با بهره‌گیری از روش‌های تنظیم  $Sbs^\pm$  و  $OTR$ . (الف)  $EC_{max}$  و (ب)  $EC_{RMS}$ .

۱۱- در جدول و شکل‌ها باید واحد پارامترها و مقیاس‌ها ذکر گردد.

۱۲- نمودارها حتماً با فرمت تصویر در متن قرار داده شوند (شکل ۴).



شکل ۴- تابع حقیقی موجک مورلت [۱].

علاوه‌بر نکات ذکر شده رعایت موارد زیر نیز در ارتباط با شکل‌ها و جدول‌ها الزامی است:

۱- عنوان جدول‌ها در بالا و عنوان شکل‌ها در زیر آنها ذکر می‌گردد.

۲- ذکر مرجع در انتهای عنوان شکل‌ها و جدول‌هایی که از مرجع دیگری اقتباس شده‌اند، الزامی است.

۳- گذاشتن نقطه در انتهای عنوان شکل‌ها و جدول‌ها ضروری است.

۴- لازم است قبل از شکل‌ها و جدول‌ها در متن اصلی، با ذکر شماره‌ی شکل یا جدول به آنها اشاره شده باشد.

۵- عنوان شکل کمتر از یک خط، به‌صورت جمله‌ی

۸- در رسم شکل‌هایی با دو یا چند نمودار رنگی، به‌منظور وضوح چاپ سیاه و سفید، از گونه‌های مختلف خط پر، خط نقطه و خط چین استفاده شود. زمینه‌ی تمامی تصاویر روشن و حروف نوشته شده در آنها با رنگ مشکی باشند.

۹- تمامی شکل‌ها دارای کیفیت قابل قبول باشند و حداقل با رزولوشن ۳۰۰ نقطه در اینچ تهیه شوند.

۱۰- اندازه و ابعاد شکل‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که هم با متن همخوانی داشته باشد، هم‌اینکه اعداد و پارامترهای درون آن با وضوح کامل مشخص باشد.

و محدودیت‌های هر یک از روش‌های بحث شده در طول تحقیق می باشد. خاطرنشان می‌شود بخش نتیجه‌گیری نباید تکرار مقدمه باشد. در مقاله حاضر، سعی بر آن بود تا با ارائه یک نمونه عملی، مشخصات مقاله آماده به چاپ برای مجله پژوهش‌های عمران و محیط‌زیست بیان شود. امید است با موارد ذکر شده، امکان ارائه نشریه‌ای پربارتر به مخاطبین دانشمند این مجله فراهم شود.

### قدردانی

(در صورت لزوم)

۱۳- در تنظیم جدول اگر عبارات به صورت فارسی می باشد باید از راست به چپ تنظیم شود (نمونه جدول ۱).  
برای ارجاع به جداول و شکل‌ها نباید از پرانتز استفاده شود. مثلاً «جدول (۱)» نادرست و «جدول ۱» درست است.

### ۴- نتیجه‌گیری

این بخش شامل بررسی نتایج مهم، اهمیت نسبی مباحث و همچنین در صورت لزوم مقایسه‌ای از ویژگی‌ها

### مراجع

در انتهای مقاله، فهرست کاملی از کتب، مقالات، سایت‌ها و نرم‌افزارهایی که در فرآیند نگارش از آنها استفاده شده و به آنها ارجاع داده شده است، تنظیم می‌شود. مراجع به ترتیب ظاهر شدن در متن مقاله شماره‌گذاری گردیده و در انتهای مقاله آورده شوند. دقت شود که تمام مراجع در متن مورد ارجاع واقع شده باشند.

در مورد مراجع موارد زیر حتما رعایت شود:

- ۱- در متن، اعداد داخل [ ] به فارسی نوشته شود.
- ۲- در انتهای مقاله و در بخش مراجع، اعداد داخل [ ] برای مراجع انگلیسی، به صورت انگلیسی مورد استفاده قرار گیرد.  
در متن مقاله و برای اعداد داخل [ ] نکات زیر رعایت شود:
  - ۱- برای ذکر یک مرجع به صورت [۳] نوشته شود.
  - ۲- برای ذکر دو مرجع از حرف ربط «و» استفاده شود. برای مثال، برای مراجع ۳ و ۴ به صورت [۳ و ۴] نوشته شود.
  - ۳- برای ذکر ۳ مرجع متوالی و بیشتر از خط فاصله استفاد شود. برای مثال، برای مراجع ۳، ۴، ۵ و ۶ به صورت [۳-۶] نوشته شود. در صورتی که مراجع به صورت متوالی نبودند؛ برای مثال ۲، ۷ و ۹، به صورت [۲، ۷ و ۹] بیان شود.
  - ۴- کلیه مراجع می‌بایست به صورت انگلیسی در انتهای مقاله آورده شود.  
شیوه نگارش در منابع (فرمت APA) در نمونه‌های زیر قابل مشاهده است:
    - ۱- نحوه ارجاع به کتاب: ارجاع به کتب و پایان‌نامه‌ها مطابق نمونه‌های زیر صورت می‌گیرد:  
نام خانوادگی، حرف اول نام (مؤلفان و مترجمان). (سال انتشار به عدد). "عنوان اصلی کتاب"، شماره ویرایش، محل انتشار.

[۱] عارف‌زاده، ط. (۱۳۹۵). "تشخیص موقعیت آسیب در سدهای بتنی وزنی با استفاده از آنالیز موجک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

[1] Arefzade, T. (2016). "Identifying the Location of Damage in Concrete Gravity Dams Using Wavelet Analysis", MSc Thesis, Faculty of Engineering, University of Qom.

[2] Kaveh, A. (2014). "Advances in metaheuristic algorithms for optimal design of structures. Switzerland", Springer.

۲- نحوه ارجاع به مقاله: ارجاع به مقالات مطابق نمونه‌های زیر صورت می‌گیرد:

نام خانوادگی، حرف اول نام مؤلف اول، نام خانوادگی، حرف اول نام مؤلف دوم. (سال انتشار). "عنوان مقاله"، نام کامل مجله، شماره دوره یا جلد، شماره مجله، شماره صفحات.

[3] Arefzade, T., Hoseini Vaez, S.R., Naderpour, H., & Ezzodin, A. (2016). "Identifying Location and Severity of Multiple Cracks in Reinforced Concrete Cantilever Beams Using Modal and Wavelet Analysis", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(1), 72-83.

[4] Kaveh, A., Hoseini Vaez, S.R., Hosseini, P., & Fallah, N. (2016). "Detection of damage in truss structures using Simplified Dolphin Echolocation algorithm based on modal data", *Smart Structures and Systems*, 18(5), 983-1004.

۳- نحوه ارجاع به سایتها (تارنها):

نام شرکت/نام فرد. (سال انتشار). "عنوان صفحه"، آدرس اینترنتی.

[5] Frenklach, M., Bowman, T., Smith, G., Gardiner, B. (2007). "GRI Database", [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/index.html](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/index.html).

۴- نحوه ارجاع به نرم‌افزارها: در این موارد ذکر نام لوح فشرده، مؤسسه تهیه‌کننده و سال پدید آمدن الزامی است.

۵- لازم به ذکر است که حروف اول کتب و مقالات انگلیسی، با حروف بزرگ (Capital) نوشته می‌شود. البته به استثنای حروف تعریف و اضافه‌ای که در آغاز عنوان نباشند.



**First Author\***

First Author Affiliation

**e-mail:** cer@qom.ac.ir

**Second Author**

Second Author Affiliation

**e-mail:**

**Title (Font: Times New Roman, 14, Bold)**

*The abstract should include the purpose, design/methodology/approach, findings, research limitations/implications and originality/value. Abstract of the paper must be between 150-200 words (Times New Roman, 11, Italic).*

**Keywords:** Times New Roman 10, Times New Roman 10 (*Between 4-6 words*).

---

\* Corresponding author

Received 00 Month 0000, Revised 00 Month 0000, Accepted 00 Month 0000.

DOI: 10.22091/cer.0000.0000.0000



**M. Shokrollahi**

M.Sc. Student, Department of  
Civil Engineering, University of  
Semnan.

**e-mail:** mohammadshk@semnan.ac.ir

**Kh. Hoseini\***

Associate Professor, Department  
of Civil Engineering, University  
of Semnan.

**e-mail:** khhoseini@semnan.ac.ir

**S.F. Mousavi**

Professor, Department of Civil  
Engineering, University of  
Tabriz.

**e-mail:** Mousavi\_sf@yahoo.com

**Numerical Modeling of the Effect of Changing  
the Geometry of Fishway Structure on the Flow  
Through Its Vertical Slot**

*In the present study, hydraulics of vertical slot is simulated, using Flow-3D.  $k-\varepsilon$  turbulence model had the most performance among different turbulence models. Next, the velocity pattern, volume of fish rest-area, and flow turbulence in the channel were analyzed in order to evaluate the performance of fishway with different geometries. In this regard, the influence of geometry on the performance of fishway is investigated. Results showed that by decreasing the ratio of the length of the large wall to the small wall, the longitudinal component of velocity was decreased by an average of 25.11%. By increasing the end of the large-wall angle with respect to the pool wall, the volume of the rest area was increased by 3%. By the increasing the end of the large-wall angle with respect to the pool wall parameter, the turbulence energy was increased by an average of 30.66%. In general, the ratio of the length of the large wall to the small wall has a greater effect on reducing the flow velocity for the fish to cross the fishway and also by increasing the end of the large-wall angle with respect to the pool wall, the rest area of the fish and turbulence energy has increased.*

**Keywords:** Fishway, Velocity profile, Turbulence, Rest area, Flow-3D.

---

\* Corresponding author

Received 04 August 2019, Revised 18 September 2019, Accepted 28 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4691.1162



**R. Sobhkhiz**

Civil Engineering  
Department, Engineering  
Faculty, Islamic Azad  
University of Lahijan

**e-mail:** sobhkhizarman@yahoo.co.uk

**A. Mardookhpour\***

Civil Engineering  
Department, Engineering  
Faculty, Islamic Azad  
University of Lahijan

**e-mail:** alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

## **Numerical Simulation of the Effect of Pile Geometry and Foundation on Local Scour in Inclined Bridge Group Pier**

*In this research, due to the importance of identifying the mechanisms affecting the scouring on this types of bridge piers, the effect of the geometric shape of the piles installed under the inclined piers and also the effect of the pile cap leveling in the sedimentary bed have been investigated and the properties of the scouring around the inclined pier group was studied numerically using the FLOW-3D software. The study of total shear stress in the flow bed at different leveling of the pile caps shows that the highest shear stress is created when the pile cap position is at the same level as the river bed; by installing the pile cap at a lower level than the river bed, the maximum shear stress decreases. This may be due to the fact that in this case, the distance between the pier group increases and the presence of the second pier decreases the flow rate in the pier group and different pier in the one pier group acts as the two independent piers in the formation of the flow pattern. By comparing the final longitudinal sections of the scouring at different leveling of the pile cap, it is concluded that the largest reduction in scouring depth occurs in aerofoil-shaped pile caps and pile caps with the sharper nose and better aerodynamic shapes are good options to control the horseshoe vortices and will reduce the scouring depth around the inclined pier group.*

**Keywords:** scouring hole, FLOW-3D software, bridge, pile; Numerical simulation.

---

\* Corresponding author

Received 23 April 2019, Revised 21 August 2019, Accepted 30 August 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4278.1149



**S. Emami**

Ph.D. student of Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.

**e-mail:** somayhemami70@gmail.com

**J. Parsa\***

Assistant Professor of Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.

**e-mail:** jparsa@tabrizu.ac.ir

## Numerical Investigating of Flow and Discharge Coefficient Over the Duckbill and Oblique Weirs

*For a given channel width, duckbill and oblique weirs have longer effective length, and this could be effective on their discharge coefficients and efficiency. In this study, we tried to examine the role of some of the hydraulic and geometric parameters of mentioned weirs and their height on the discharge coefficient into the channel using the Fluent numerical model and the results of this model compared with the Flow-3D model and experiments data. The pressure, velocity, turbulence, and the free surface of the flow were modeled by  $k-\varepsilon$  RNG and volume of fluid (VOF) algorithms, respectively. The NRMSE of the Fluent model in the simulation of the discharge coefficient was 0.0565, which indicates the high accuracy of the model. Results showed that in both weirs, the discharge coefficient decreases with increasing discharge or upstream head. The maximum discharge coefficient was found in the  $H/P \leq 0.35$  in both weirs. The results indicated the oblique weirs had a higher discharge coefficient compared with duckbill weirs and thus had higher flow capacity.*

**Keywords:** Discharge Coefficient, Duckbill Weir, Oblique weir,, Turbulence Model, Volume of Fluid.

---

\* Corresponding author

Received 17 April 2019, Revised 23 August 2019, Accepted 02 October 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4259.1144



**M.K. Moayyedi\***

Department of Mechanical  
Engineering, University of  
Qom

**e-mail:** moayyedi@qom.ac.ir

**A. Bashardust**

Graduated B.Sc. in Mechanical  
Engineering, Department of  
Mechanical Engineering,  
University of Qom

**e-mail:** bashardoust69cr7@gmail.com

## **Numerical Simulation of Airflow and Particle Deposition from the Surface of Raw Materials Piles and Studying the Effects of Shape Variations and Free-Stream Velocity in Wind Erosion Reduction**

*Accumulation of consumable or produced materials in outdoor areas and exposed to the air flow is an important issue of environmental concern. Also, wind erosion of raw materials from the storage piles in some industries causes environmental problems and economic consequences. The materials are accumulated in various volumetric shapes in an outdoor environment, which is usually pyramidal and conical. The subject of this study is about the percentage of wind erosion from the surface of the pile and the intensity of the particles deposition due to the free-stream flow passing through the various points of the pile's surface. In this research, the wind erosion or in other words, the movement and deposition of particles from the surface of the pile have been discussed. So, a comparison between the piles with different shapes has been performed according to the reduction of wind erosion. So, a comparison between the piles with different shapes has been performed according to the reduction of wind erosion.*

**Keywords:** Wind erosion rate, cone pile, pyramid pile, Eulerian-Lagrangian Approach, Environmental fluid dynamics.

---

\* Corresponding author

Received 02 April 2019, Revised 30 July 2019, Accepted 18 August 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4211.1143



**H. Mohammadi Anaie**

Highway and  
Transportation M.Sc.  
Student, Engineering  
Faculty, Yazd University.

**e-mail:**  
hasanmohamadi@stu.yazd.ac.ir

**M. M. Khabiri\***

Associated Professor,  
Engineering Faculty, Yazd  
University.

**e-mail:**  
mkhabiri@yazd.ac.ir

**H. Khani Sanij**

Assistance Professor,  
Engineering Faculty, Yazd  
University.

**e-mail:** Khani@yazd.ac.ir

**F. Matin Ghahfarrokhi**

Highway and  
Transportation M.Sc.  
Student, Engineering  
Faculty, Yazd University.

**e-mail:**  
Matin@stu.yazd.ac.ir

**Laboratory Evaluation and Numerical Analysis  
Effect Use of Sillimanite Mineral Wastes as  
Course- Aggregate on Surface Sliding and  
Stiffness of Asphaltic Mixture**

*Overburdens are stones that lack the required properties of minerals to be extracted and are piled adjacent to mine, while they may be used as aggregates in the asphalt mixture. Settlement is a cheap mineral composed of iron oxide, silicone and aluminum oxide, application of iron, silica and aluminum as aggregates in pavement industry has great effect on performance of asphalt mixtures. In this study, we investigated the effect of using Sillimanite aggregate material as an alternative for Limestone aggregates on resilient modulus, Marshall Strength and skid resistance parameters at various temperatures. The modeling was carried out by using finite element software based on the elastic behavior of the layers to determine the effect of elasticity modulus variations due to the change in aggregate type on the pavement response. The results indicated that the use of Sillimanite aggregates in the asphalt mixture led to a lower optimum bitumen percent than Limestone material; and also, in the asphalt mixture made of Sillimanite aggregates with optimum bitumen percent, Marshall Strength was increased by 15% and the resilient modulus by 25% compared to the mixture with Limestone material. Application of Sillimanite material in the asphalt mixture could enhance the friction resistance of the mixture against the abrasion resulting from traffic loading due to its higher hardness compared to Limestone material. The results of numerical analysis showed that the aggregate's type had the lowest effect on the critical tensile strain at the bottom of the asphalt layer, then came the percentage of bitumen in the mixture and, finally, the bonding of the layers had the highest effect.*

**Keywords:** Sillimanite Mineral Waste, skid resistance, Hot Asphalt Mixture, Resilient Modulus, Aggregate Materials.

---

\* Corresponding author

Received 09 May 2019, Revised 30 August 2019, Accepted 07 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4355.1151



**R. Mikaeil\***

Faculty of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
Urmia University of  
Technology.

**e-mail:** Reza.mikaeil@gmail.com

**M. Ataei**

Faculty of Mining, Petroleum  
and Geophysics, Shahrood  
University of Technology.

**e-mail:** Ataei@shahroodut.ac.ir

**F. Sereshki**

Faculty of Mining, Petroleum  
and Geophysics, Shahrood  
University of Technology.

**e-mail:** F.sereshki@gmail.com

**A. Jafarpour**

Department of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
Yazd University.

**e-mail:**

Amir.jafarpour@stu.yazd.ac.ir

## **Evaluation of the Environmental Impacts of Groundwater Levels Drop Due to the Excavation of Large-Scale Tunnels (Case Study: Kouhin Rail-Way Tunnel)**

*Today, one of the challenges in safety management of underground excavations is the water inflow into them. The tunnels and underground constructions are causing to remove a pile of soil and rock area and significant changes in the state of tension it's around environment. Invasion of groundwater into the excavation area is a major problem in excavation of tunnels that is located below the hydrostatic levels. The underground-water inflow into the tunnels is an important issue in the tunnel engineering. The subsidence of the ground in hydrostatic levels, reduce the aqueduct water resources and springs that are located in downstream of the tunnel, are environmental problems of the tunnel excavation operations. In the present study, the groundwater inflow into the Kouhin tunnel railway is modeling with FLAC<sup>2D</sup> software. The effects of groundwater inflows in the tunnel that while excavation are studied by numerical model. In other hands, initially investigated the adverse environmental effects caused by the Kouhin railway tunnel excavation (subsidence the ground water levels and changes in the groundwater inflow in the region) and then provide some strategies for reducing these effects. The strategies that can be used in prevention of groundwater flow into the underground tunnels are: Underground water level recovery with application of concrete sealing operations without drainage and simultaneous use of forepoling methods that to be presented as a solution to reduce environmental impact. Doing this requires using of concrete lining with high strength properties to withstand hydrostatic pressure of water collected on the back cover.*

**Keywords:** Safety Management, Environmental Impact, Ground Subsidence, Groundwater Level, FLAC<sup>2D</sup>

---

\* Corresponding author

Received 05 May 2019, Revised 21 August 2019, Accepted 09 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4328.1150



**H. Noforesti**

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

**e-mail:**

hnoferesty@birjand.ac.ir

**A. Veiskarami**

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

**e-mail:**

veiskaramiali@yahoo.com

**M.J. Rahimdel\***

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

**e-mail:**

rahimdel@birjand.ac.ir

**Study and Analysis of Landslide Potential Using Numerical Modeling (A Case Study: Ghaen-Afin Roadway in Southern Khorasan)**

*Steep slopes developed on the loose ground, either natural or artificial, are prone to landslide phenomena. During construction activities for the development of new Qaen-Afin road in South Khorasan and adjacent to Ravoshk village, a sudden landslide occurred in a shale slope, and newly-built stone bridge for the road destructed. In this paper, using geologic conditions, satellite images, the field evidence of landslide and SLIDE6 and Phase2 programs, the type, and cause of the landslide will be examined. The survey conducted with the help of satellite images and field visits showed that the landslide occurred is a circular landslide with dimensions of approximately 50×80 m. It had happened a few months ago, but unfortunately, no attention paid to it, and continued construction activities in the rainy season stimulated the sliding mass and led to extreme conditions. The geometrical condition of the slope, just before the slope failure, was determined by using GPS, surveying meter, and satellite images. Using this information, the two-dimensional model of the natural slope, before any construction activity, created in SLIDE6. Slope stability analysis was performed using the simplified Bishop limit equilibrium method, and failure of the slope predicted successfully. Finite element analysis of the slope in Phase2 software arrived at similar results. This paper has shown that a lack of attention to first slope movements and continuing construction work was the primary cause of financial losses incurred.*

**Keywords:** Landslide, Limit equilibrium method, Finite element method, Ravoshk village, Southern Khorasan.

---

\* Corresponding author

Received 14 July 2019, Revised 26 August 2019, Accepted 03 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4620.1160



**M. Isari**

PhD, Faculty of Civil  
Engineering, University of  
Tabriz, 29 Bahman Blvd.  
5166616471, Tabriz, Iran.

**e-mail:** isari.mohsen@tabrizu.ac.ir

**R. Tarinejad\***

Associate Professor, Faculty of  
Civil Engineering, University of  
Tabriz, 29 Bahman Blvd.  
5166616471, Tabriz, Iran.

**e-mail:** r\_tarinejad@tabrizu.ac.ir

**S. K. Razavi**

PhD Candidate, Faculty of Civil  
Engineering, University of  
Tabriz, 29 Bahman Blvd.  
5166616471, Tabriz, Iran.

**e-mail:** skrazavi2010@gmail.com

## The Effects of Underground Structure on the Free Field Displacement Under Uniform and Non-Uniform Excitation

*In this study, the effects of a subway station on the surface ground motion subjected to uniform and the non-uniform propagating seismic wave is investigated. Numerical analysis is carried out by finite difference method using FLAC software. Seismic wave scattering considering and ignoring the effects of the underground station in the case of uniform and non-uniform excitation is performed, and corresponding amplification factors on the free field displacement are discussed. The major results of this study indicated that the possible large amplification factor on seismic waves considering the underground station is obtained. Therefore, it should be paid more attention to seismic design for surface structures.*

**Keywords:** Uniform Excitation, Amplification, Underground Structure, Finite difference, Non-Uniform Excitation.

---

\* Corresponding author

Received 26 August 2019, Revised 06 October 2019, Accepted 20 October 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4760.1167



**M. Sharifi \***

Assistant Professor,  
Department of Civil  
Engineering, Faculty of  
Engineering, University of  
Qom.

**e-mail:** m.sharifi@qom.ac.ir

**A. Moezi**

Lecturer, Department of Civil  
Engineering, Faculty of  
Engineering, University of  
Qom.

**e-mail:** moezi@qom.ac.ir

**N. Sobati**

MSc Student, Department of  
Civil Engineering, Faculty of  
Engineering, University of  
Qom.

**e-mail:** sobati.nasim@yahoo.com

## **The Seismic Fragility Curve of Atmospheric Steel Storage Tanks on a Pile**

*Fluid storage tanks, especially above ground tanks, are categorized as important and essential in energy infrastructure. These storages, which are mostly used to store petroleum fluids and fire water supplies, are therefore of great importance to the exploitation of tanks after the earthquakes. Fragility or vulnerability curve is one of the most effective tools for estimating the damage caused by the earthquake. Preparing the seismic fragility curve of above ground tanks on a pile is the aim of this research. This fragility curve is achieved regardless of tank body damage and only by focusing on the structural behavior of the foundation. These tank types are primarily built on low load bearing areas. In this study, three tank types that have been designed in accordance with API650-13 have been investigated in a practical project. For this purpose, using the static nonlinear analysis method, the structural capacitance curve of tanks was first obtained. Then, the seismic performance of these tanks was obtained for 12 spectra from different records with different accelerations. After calculating the damage indexes on the structure, the appropriate statistical distribution for the failure criteria was chosen. Finally, the calculation of the probability of failure for the fracture curve of the required tanks was obtained.*

**Keywords:** Atmospheric Steel Storage Tank, Fragility Curve, Pile, Damage.

---

\* Corresponding author

Received 28 June 2019, Revised 23 August 2019, Accepted 13 October 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.3804.1136



**P. Hosseini\***

Faculty of Engineering,  
Mahallat Institute of Higher  
Education, Mahallat.

**e-mail:** p.hosseini@mahallat.ac.ir

**M. Hosseini**

Structural Engineering  
Research Center, International  
Institute of Earthquake  
Engineering and Seismology  
(IIEES).

**e-mail:** hosseini@iiees.ac.ir

**S. M. Omranizadeh**

Faculty of Technical and  
Engineering, South Tehran  
Branch, Islamic Azad  
University.

**e-mail:**  
mohammad.omrani68@gmail.com

## **The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Non-linear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators**

*In this study, a comparative study of non-linear static methods with time history method for Chevron braced structures (with LRB seismic base isolator at the base level) is performed. To find out the effect of the building's height on seismic responses of isolated structures, in this study 3 isolated building structures by LRB isolators with 3 different number of stories of 4, 7 and 10, located in a high seismicity area have been modeled in 3D by assuming the soil type C. Pushover non-linear static analysis procedures, with target displacements according to ASCE41-13 code and using three lateral load patterns, including structure's first mode, uniform and triangular have been analyzed using spectral dynamic, PSC and the results have been compared with those of non-linear dynamic analysis subjected to selected far-field earthquakes. The results show that in the estimation of maximum displacement of LRB isolators and also the amount of base shear, ASCE41-13 has a high degree of accuracy in structures with different heights. In estimating the displacement of maximum floors, first mode methods, uniform, spectral dynamic have had enough accuracy in all discussed heights. In estimating the relative displacement of structures' floors, by increasing the height of the structure, the accuracy of the triangular load's pattern reduces significantly. In contrast with it, the PSC method has high accuracy.*

**Keywords:** Isolated structures, Lead rubber bearing (LRB), Nonlinear static and dynamic analysis procedures, Effect of height in accuracy of nonlinear static analysis of pushover.

---

\* Corresponding author

Received 01 September 2019, Revised 02 October 2019, Accepted 04 October 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4899.1180



**P. Sartaji\***

Department of Civil  
Engineering, Ardabil Branch,  
Islamic Azad University,  
Ardabil, Iran.

**e-mail:** p.sartaji@iauardabil.ac.ir

**A. Sarvghad Moghadam**

Structural Engineering  
Research Centre, International  
Institute of Earthquake  
Engineering and Seismology,  
Tehran.

**e-mail:** moghadam@iiees.as.ir

## **Large and Small-Scale Modeling of Squat Shear Walls to Simulate Cyclic Behavior**

*Reinforced concrete squat walls with an aspect ratio less than 2 are prevalent in low-rise construction and at lower levels of tall buildings or nuclear power plants. They show a significant amount of shear deformation as compared to bending deformation. Shear strength governs the design of such walls. Prediction of seismic behavior, and followed by the design of these systems need an efficient modeling method. this study calibrates the effective modeling parameters of squat shear walls in small and large scales based on the test results. The modeling to be accomplished initially with non-linear finite element software on small scale (Vector2) and then with software by large scaleability (OpenSees), and the results were calibrated with test results. The study results show nonlinear finite element software has high accuracy in squat shear wall modeling. However, if a large-scale squat shear wall modeling along with a three-dimensional structure is required, on condition of a suitable aspect ratio, this paper is recommended to use OpenSees software.*

**Keywords:** squat shear wall, modeling in small scale, modeling in large scale, nonlinear finite element.

---

\* Corresponding author

Received 04 January 2019, Revised 28 August 2019, Accepted 30 August 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.3946.1138



**S. M. Abdollahi**

Young Researchers and Elite Club, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran.

**e-mail:** sm.abdolahi71@gmail.com

**A. Tavana Amlashi**

Young Researchers and Elite Club, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran.

**e-mail:** amir.tavana.amlashi@gmail.com

**M. M. Ranjbar\***

Technical College, University of Guilan, Rasht, Iran.

**e-mail:** ranjbar@guilan.ac.ir

**Analytical Study of Punching Shear Capacity in Reinforced Concrete Flat Slabs with Opening Strengthened with Steel Plates and Shear Stud**

*Reinforced concrete flat slabs are widely employed in structural systems. The location of the slab-column connection is the most sensitive part of the flat slab due to the existence of a high flexural anchor and shear force. On the other hand, the utilization of flat slabs directly resting on columns, in the case of punching shear failure, reveals their vulnerability that the presence of openings will increase the probability of punching shear failure. This study is the numerical study of the effect of strengthening the reinforced concrete flat slabs with opening and external steel plates on the punching shear capacity. Initially, verification of the numerical model by the experimental sample conducted. Then some reinforced concrete flat slabs with reinforced opening and external steel plates with various dimensions and thickness as well as diameter, length, number and order of the different shear studs under the load, by using the finite element method analysis and the results of the various samples were compared with each other. The strengthening of the reviewing slabs improved the condition of stiffness and increased the punching shear capacity. The reviews also indicated that this situation improve dependent on the dimensions and the thickness of the plate and the diameter, length, number, and order of the shear studs. The results of this research suggested that if you use the right behavioral model in the simulation process, the finite element method can be a useful tool for analysis and secure and optimum design of reinforced concrete slab.*

**Keywords:** Flat slab, Punching shear, Steel plates, Opening, Shear stud.

---

\* Corresponding author

Received 13 January 2019, Revised 26 July 2019, Accepted 02 August 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.3982.1139



## Contents:

### **Analytical Study of Punching Shear Capacity in Reinforced Concrete Flat Slabs with Opening Strengthened with Steel Plates and Shear Stud**

Seyed Mohammad Abdollahi, Amir Tavana Amlashi and Malek Mohammad Ranjbar

### **Large and small-scale modeling of squat shear walls to simulate cyclic behavior**

Parisa Sartaji and Abdoreza Sarvghad Moghadam

### **The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Non-linear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators**

Pedram Hosseini, Mahmood Hosseini and Seyed Mohammad Omranizadeh

### **The Seismic Fragility Curve of Atmospheric Steel Storage Tanks on a Pile**

Mahdi Sharifi, Abolghasem Moezi and Nasim Sobati

### **The Effects of Underground Structure on the Free Field Displacement Under Uniform and Non-Uniform Excitation**

Mohsen Isari, Reza Tarinejad and Seyed Kazem Razavi

### **Study and Analysis of Landslide Potential Using Numerical Modeling (A Case Study: Ghaen-Afin Roadway in Southern Khorasan)**

Hossain Nofereesti, Ali Veiskarami and Mohammad Javad Rahimdel

### **Evaluation of the Environmental Impacts of Groundwater Levels Drop Due to the Excavation of Large-Scale Tunnels (Case Study: Kouhin Rail-Way Tunnel)**

Reza Mikaeil, Mohammad Ataei, Farhang Sereshki and Amir Jafarpour

### **Laboratory Evaluation and Numerical Analysis Effect Use of Sillimanite Mineral Wastes as Course- Aggregate on Surface Sliding and Stiffness of Asphaltic Mixture**

Hasan Mohammadi Anaie, Mohammad Mehdi Khabiri, Hamed Khani Sanij and Fatemah Matin Ghahfarrokhi

### **Numerical Simulation of Airflow and Particle Deposition from the Surface of Raw Materials Piles and Studying the Effects of Shape Variations and Free-Stream Velocity in Wind Erosion Reduction**

Mohammad Kazem Moayyedi and Ali Bashardust

### **Numerical Investigating of Flow and Discharge Coefficient Over the Duckbill and Oblique Weirs**

Somayeh Emami and Javad Parsa

### **Numerical Simulation of the Effect of Pile Geometry and Foundation on Local Scour in Inclined Bridge Group Pier**

Ramtin Sobhkhiz and Alireza Mardookhpour

### **Numerical Modeling of the Effect of Changing the Geometry of Fishway Structure on the Flow Through Its Vertical Slot**

Mohammad Shokrollahi, khosrow hosseini and seyed Farhad Mousavi





University of Qom

## Civil and Environmental Researches

Vol. 5, Issue. 1  
Spring and Summer 2019

### License Holder:

University of Qom

### General Director:

Dr. Ali Mohammad Rajabi, Assistant Professor,  
Engineering Geology Department, University of  
Tehran

### Editor in Chief:

Dr. Ali Ghanbari, Professor, Department of Civil  
Engineering, University of Kharazmi

Dr. Seyed Rohollah Hoseini Vaez, Associate  
Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Qom

### Technical and Text Editor:

Tahere Arefzade, Master of Civil Engineering,  
Department of Civil Engineering, University of  
Qom

Cover Design: Seyed M. Javad Hoseini Vaez

Interior Design: Tahere Arefzade

Publishing Supervisor: Mohammad Reza Shojaei

Print ISSN: 2476-406x

Online ISSN: 2476-4051

### **Editorial Board:**

**Morteza Eskandari-Ghadi**, Professor,  
Department of Civil Engineering, Tehran  
University

**Seyed Rohollah Hoseini Vaez**, Associate  
Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Qom

**Mashallah Khamechyan**, Professor, Department  
of Engineering Geology, Tarbiat Modares  
University

**Mahdi Khodaparast**, Associate Professor,  
Department of Civil Engineering, University of  
Qom

**Taher Rajaei**, Associate Professor, Department of  
Civil Engineering, University of Qom

**Ali Ghanbari**, Professor, Department of Civil  
Engineering, University of Kharazmi

**Vahid Nourani**, Professor, Department of Civil  
Engineering, University of Tabriz

### **International Editorial Board:**

**Janusz Wasowski**, Professor, National Research  
Council, Roma, Italy

**Hakim S. Abdelgader**, Professor, Department of  
Civil Engineering, Faculty of Engineering,  
University of Tripoli, Tripoli, Libyan Arab  
Jamahiriya



**Mailing Address:** Civil and Environmental Researches,

Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

**Postal Code:** 3716146611

**Tel:** +98-25-32103590 **Fax:** +98-25-32854228

**Website:** <http://cer.qom.ac.ir/>

**Email:** cer@qom.ac.ir



University Of Qom

Journal of

# Civil and Environmental Researches

Volume 5, Issue 1, Spring & Summer 2019

- 01-20 Analytical Study of Punching Shear Capacity in Reinforced Concrete Flat Slabs with Opening Strengthened with Steel Plates and Shear Stud  
**Seyed Mohammad Abdollahi, Amir Tavana Amlashi and Malek Mohammad Ranjbar**
- 21-33 Large and small-scale modeling of squat shear walls to simulate cyclic behavior  
**Parisa Sarfaji and Abdoreza Sarvghad Moghadam**
- 35-49 The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Non-linear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators  
**Pedram Hosseini, Mahmood Hosseini and Seyed Mohammad Omrantzadeh**
- 51-60 The Seismic Fragility Curve of Atmospheric Steel Storage Tanks on a Pile  
**Mahdi Sharifi, Abolghasem Moezi and Nasim Sobati**
- 61-75 The Effects of Underground Structure on the Free Field Displacement Under Uniform and Non-Uniform Excitation  
**Mohsen Isari, Reza Tarinejad and Seyed Kazem Razavi**
- 77-88 Study and Analysis of Landslide Potential Using Numerical Modeling (A Case Study: Ghaen-Afin Roadway in Southern Khorasan)  
**Hossain Noferesti, Ali Veiskarami and Mohammad Javad Rahimdel**
- 89-103 Evaluation of the Environmental Impacts of Groundwater Levels Drop Due to the Excavation of Large-Scale Tunnels (Case Study: Kouhin Rail-Way Tunnel)  
**Reza Mikaeil, Mohammad Ataei, Farhang Sereshki and Amir Jafarpour**
- 105-119 Laboratory Evaluation and Numerical Analysis Effect Use of Sillimanite Mineral Wastes as Course- Aggregate on Surface Sliding and Stiffness of Asphaltic Mixture  
**Hasan Mohammadi Anaie, Mohammad Mehdi Khabiri, Hamed Khani Sanij and Fatemah Mafin Ghahfarokhi**
- 121-134 Numerical Simulation of Airflow and Particle Deposition from the Surface of Raw Materials Piles and Studying the Effects of Shape Variations and Free-Stream Velocity in Wind Erosion Reduction  
**Mohammad Kazem Moayyedi and Ali Bashardust**
- 135-145 Numerical Investigating of Flow and Discharge Coefficient Over the Duckbill and Oblique Weirs  
**Somayeh Emami and Javad Parsa**
- 147-164 Numerical Simulation of the Effect of Pile Geometry and Foundation on Local Scour in Inclined Bridge Group Pier  
**Ramin Sobhkhiz and Alireza Mardookhpour**
- 165-176 Numerical Modeling of the Effect of Changing the Geometry of Fishway Structure on the Flow Through Its Vertical Slot  
**Mohammad Shokrollahi, Khosrow hosseini and seyed Farhad Mousavi**

ISSN: 2476-406X

Journal website : <http://cer.qom.ac.ir>