Civil Infrastructure Researches, Vol. 6, Issue.2, Winter 2021, pp. 13-23

Investigation of the Effect of Wave Height, Period and Spectrum on the Layout of Breakwaters (Case Study: Brizak Port)

H. Heidary-Torkamani[*]

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

e-mail: Hamid_heidary@sut.ac.ir

M. H. Moeini

PhD, coastal Eng., Pouya Tarh Pars Consulting Engineers Company, Tehran, Iran.

email: m.h.moini@ptpco.com

Breakwaters are among the most expensive structures in port infrastructure and therefore the optimal design of their layout to form a port basin is very important. Nowadays, in most engineering activities, the BW (Boussinesq Wave) module of the Mike21 software package is used to study and analyze the tranquillity of the port basin or to achieve the wave diffraction pattern inside the port basin. This study aims to investigate the sensitivity of the diffraction coefficients obtained from the BW model to the height, period, and type of spectrum of the incident wave. For this purpose, Brizak port has been selected for the case study and in several numerical models, the height, period and type of input wave spectrum in a specified range have been changed. In each of the models, the diffraction coefficients in a specific location are extracted and the trend of its changes is investigated. According to the results, increasing the wave period increases the diffraction coefficients in the basin while increasing the wave height reduces the diffraction coefficient.

Keywords: Breakwater, Basin Calmness, Boussinesq Wave, Diffraction Coefficient, Port Infrastructure

[*] Corresponding author

Received 26 February 2021, Revised 22 March 2021, Accepted 29 March 2021.
DOI: 10.22091/cer.2021.6630.1231

بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع، پریود و نوع طیف امواج در طراحی جانمایی موج‌شکن‌های بنادر (مطالعه موردی بندر بریزک)

حمید حیدری ترکمانی*
استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
پست الکترونیک:
Hamid_heidary@sut.ac.ir

محمد هادی معینی
دکتری مهندسی سواحل و بنادر، مهندسین مشاور پویا طرح پارس، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
m.h.moini@ptpco.com

موج‌شکن‌ها از جمله هزینه‌برترین سازه‌ها از میان زیرساخت‌های بندری بوده و بنابراین طراحی بهینه جانمایی آن‌ها اهمیت بسیاری دارد. امروزه در اغلب فعالیت‌های مهندسی، جهت بررسی و تحلیل میزان آرامش حوضچه بنادر و یا رسیدن به الگوی تفرق امواج در داخل حوضچه، از روش عددی (مدل بوسینسک در بسته نرم‌افزاری مایک۲۱) استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی حساسیت ضرایب تفرق حاصل از مدل بوسینسیک نسبت به ارتفاع، پریود و نوع طیف موج ورودی است. بدین منظور، بندر بریزک جهت مطالعه موردی، انتخاب شده و در مدل‌های عددی متعدد ارتفاع، پریود و نوع طیف موج ورودی در دامنه مشخص تغییر داده شده است. در هریک از مدل‌ها ضرایب تفرق در محل مشخصی از داخل حوضچه استخراج شده و روند تغییرات آن بررسی گردیده است. براساس نتایج، افزایش پریود، موجب افزایش ضرایب تفرق گشته در حالی‌که افزایش ارتفاع موج با ازای پریود ثابت، موجب کاهش ضرایب تفرق می‌شود.

واژگان کلیدی: موج‌شکن، آرامش حوضچه، مدل بوسینسک (MIKE21_BW)، ضریب تفرق، زیرساخت‌های ساحلی.

۱- مقدمه

یکی از مباحث عمده مطالعات جانمایی در هر بندر، نحوهٔ آرایش موج‌شکن‌های تشکیل‌دهنده حوضچه است تا به این وسیله فضای کافی و البته آرام برای سرویس‌دهی به شناورها ایجاد شود. در عین‌حال، بایستی وضعیت ناوبری شناورها به هنگام ورود و خروج به/از بندر در آرایش بازوها به صورت یک قید مهم مدنظر قرار گیرد. در واقع، مهمترین موضوعات در طرح جانمایی بازوهای موج‌شکن بندر، تأمین شرایط ناوبری و تأمین آرامش مطلوب در حوضچه، به منظور سهولت تردد و پهلوگیری شناورها است. بنابراین پس از تعیین جانمایی اولیه اجزای بندر براساس ملزومات ناوبری و بهره‌برداری، لازم است این جانمایی (هندسه کلی طرح) برای وضعیت آرامش مناسب داخل حوضچه و براساس شاخص‌ها و معیارهای موجود کنترل شود تا در صورت عدم تأمین آرامش مطلوب، با تغییر هندسه بازوهای موج‌شکن و یا موقعیت پهلوگیری و پارکینگ شناورها، شرایط مورد نیاز تأمین شود [۱-۳].

الگوی توزیع امواج (ضرایب تفرق امواج) در داخل حوضچه بر اثر پدیده‌های تفرق، انعکاس جزئی و اتلاف انرژی در هنگام برخورد امواج به لایه‌های متخلخل موج‌شکن تعیین می‌گردد. سپس با تبیین معیارهای آرامش بندر و الگوی امواج منطقه، جانمایی حوضچه، مورد بررسی قرار می‌گیرد [۴].

برپایی مدل بوسینسک[1]، مستلزم انتخاب داده‌های ورودی به مدل شامل هیدروگرافی و پلان مورد نظر،

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۰۸، بازنگری ۱۴۰۰/۰۱/۰۲، پذیرش ۱۴۰۰/۰۱/۰۹.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2021.6630.1231

[1]- Boussinesq

مشخصات موج ورودی، مشخصات لایه تخلخل[۲] و لایه اسفنجی[۳] است که برای تعیین هریک از پارامترها در راهنمای نرم‌افزار، پیشنهاداتی ارائه شده است [۴].

از جمله مطالعات انجام شده در بررسی میزان آرامش حوضچه با استفاده از مدل بوسینسک، می‌توان به مراجع [۵] تا [۷] اشاره کرد. روش به کار رفته در بررسی آرامش حوضچه در پژوهش حاضر، روش متداول عددی مورد استفاده در اغلب فعالیت‌های مهندسی بوده و هدف اصلی این پژوهش، بررسی میزان تأثیر هریک از پارامترهای ورودی در این روش بر آرامش حوضچه است. دلیل این بررسی این است که روش متداول مهندسین مشاور در بررسی آرامش حوضچه بنادر، اجرای مدل بوسینسک برای موج با ارتفاع واحد است. علت این امر نیز آن است که برحسب گل‌موج مقابل دهانه بندر معمولاً لازم است تا آرامش حوضچه از چند جهت مختلف برای امواج ورودی بررسی شود. بدیهی است هر جهت موج دارای ارتفاع و پریود مشخص است که لزوماً برای تمام جهات یکسان نیست. بنابراین لازم است مدل برای هر جهت با ارتفاع موج شاخص (H_s) و پریود قله طیف (T_p) نظیر آن اجرا شود. برای صرفه جویی در وقت و تسریع روند بررسی آرامش حوضچه، مهندسین مشاور، مدل را برای هر جهت با ارتفاع واحد اجرا می‌کنند، سپس با فرض اینکه ضریب تفرق مقداری ثابت است، با ضرب ضریب تفرق حاصل در ارتفاع موج واقعی ورودی، مقدار ارتفاع موج داخل حوضچه تعیین می‌شود.

اطلاع از میزان و نحوه تأثیر پارامترهای ورودی در نتایج مبین آرامش حوضچه، به مهندسین طراح کمک می‌کند پارامترهای ورودی را به‌طور مناسب تخمین بزنند که این امر به طراحی بهینه بندر کمک می‌کند. به همین منظور، مطالعه انجام شده بر یک بندر واقعی (که در ادامه معرفی شده است) انجام پذیرفته است.

از جمله پارامترهای مهم در تعیین مشخصات موج ورودی به مدل، تعیین مناسب نوع طیف، ارتفاع (H) و پریود موج تابشی (T) است. هدف از این تحقیق، حساسیت‌سنجی ضرایب تفرق حاصل از مدل بوسینسک نسبت به نوع طیف، ارتفاع و پریود موج ورودی است. در اغلب کارهای مهندسی مدل بوسینسک با موج با ارتفاع واحد اجرا شده و سپس ضرایب تفرق به‌دست آمده در ارتفاع امواج واقعی ضرب می‌شود.

به منظور بررسی حساسیت ضرایب تفرق، ابتدا ضریب تفرق برای حالت $H=H_1$ به صورت زیر محاسبه شده است (پریود موج ورودی ثابت فرض شده است):

۱- ضریب تفرق با اجرای مدل برای موج با (H=1m و $T=T_1$) و ضرب کردن ضرایب تفرق به‌دست آمده در مقدار H_1

۲- اجرای مدل با موج ورودی ($H=H_1$ و $T=T_1$) و استخرج مستقیم ضرایب تفرق

۳- مقایسه نتایج به‌دست آمده و تحلیل آنها

همچنین به منظور بررسی حساسیت نسبت به پریود موج ورودی مدل با ارتفاع موج ثابت و پریودهای مختلف اجرا شده است. ضرایب تفرق، استخراج و اثر پریود موج ورودی بر ضرایب تفرق تحلیل شده است.

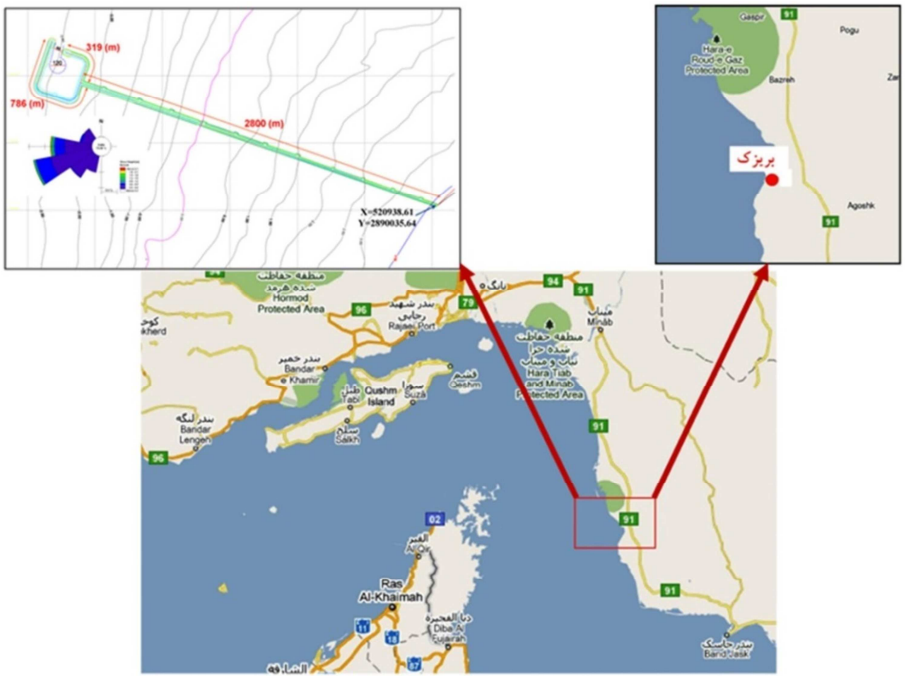
۲- معرفی بندر مورد مطالعه

مختصات محل احداث بندر بریزک ″۳۴/۰۳ ′۱۲ ۵۷° شمالی ″۴۵/۹۹ ′۷ ۲۶° شرقی است. این بندر در فاصله حدود ۳۷ کیلومتری شمال بندر کوه‌مبارک و حدود ۴۵ کیلومتری جنوب بندر سیریک قرار دارد.

براساس گل‌موج نشان داده شده در شکل ۱، جهت موج غالب در بندر بریزک از سمت غرب و غرب- جنوب غربی است. همچنین در این منطقه، اختلاف بین متوسط بالاترین مدها و متوسط پایین‌ترین جزرها حدود ۲ متر است [۸]. پلان طراحی شده برای بندر مذکور دارای یک مسیر دسترسی به طول ۲۸۰۰ متر، یک بازوی اصلی به طول ۷۸۶ متر، یک بازوی فرعی به طول ۳۱۹ متر و طول

[2]- Porosity Layer
[3]- Sponge Layer

پارکینگ قابل تأمین در امتداد موج‌شکن‌ها حدود ۱۰۰۰ متر است (شکل ۱). مساحت کل حوضچه این بندر در حدود ۷ هکتار است که حدود ۵ هکتار آن عمق ۳ متر در تراز تردد (MLLW) را تأمین می‌کند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و پلان موج‌شکن بندر بریزک

۳- روش مورد استفاده در بررسی الگوی تفـرق داخل حوضچه

برای بررسی پدیده تفرق از نرم‌افزار مایک ۲۱ استفاده می‌گردد. بدین منظور در این نرم‌افزار مدلی به نام بوسینسک تعریف شده است که به بررسی پدیده‌ها و تحلیل‌هایی از این دست می‌پردازد. این مدول، معادلات دوبعدی بوسینسک را به صورت عددی حل می‌کند. معادلات بوسینسک غیرخطی می‌باشند و برحسب فرکانس بیان می‌گردند. اساساً برای این که معادلات تفرق (پراکندگی) که براساس فرکانس تعریف می‌گردند، در معادلات جریان در نظر گرفته شوند، باید اثر فشار قائم در توزیع فشار لحاظ شود. با توجه به معادلات حاصل شده، مدل بوسینسک برای مدل‌سازی گروه موجی که از آب عمیق به آب کم‌عمق حرکت می‌کند، مناسب می‌باشد.

این مدل قادر است تا اثرات ساحل (نواحی کم عمق) و نواحی بندری را به صورت هم‌زمان بر روی امواج منتشر شده تحلیل کند. در این نواحی پدیده‌هایی چون، کم‌عمقی، تفرق، انکسار و انعکاس نسبی امواج نامنظم رخ می‌دهد که این مدول می‌تواند در محدوده‌ای با اعماق متغیر و دارای هندسه پیچیده این پدیده‌ها را بررسی کرده و برای مدل ساخته شده در نظر گیرد [۴].

با استفاده از این مدل می‌توان سازه‌ای چون موج‌شکن را که دارای تخلخل می‌باشد و در نتیجه، امواج برخوردی به آن به طور کامل منعکس نمی‌شوند، مدل‌سازی نمود. هم‌چنین در محدوده‌هایی از منطقه طرح (هم چون خطوط ساحلی) که انرژی امواج دریا تقریباً به طور کامل جذب می‌شوند، می‌توان مدل را به‌گونه‌ای تعریف کرد که این پدیده نیز در مدل‌سازی لحاظ شود.

مدل بوسینسک را می‌توان برای مطالعه دینامیک امواج و پدیده‌های حاصل از آنها در نواحی بندری و مناطق ساحلی و در نظر گرفتن وضعیت پهلوگیری شناور در شرایطی که میزان تلاطم ناشی از امواج در داخل بنادر و اثر آن در عملیات بندری حائز اهمیت است، استفاده

نمود. آشفتگی ایجاد شده در داخل حوضچه‌ها یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که باید برای تعیین موقعیت بهینه بندر در زمان طراحی جانمایی آن در نظر گرفت. نفوذ امواج دریا به درون حوضچه بندری که توسط موج‌شکن محافظت می‌شود فرآیندی است که شامل پدیده‌هایی چون کم‌عمقی، انکسار، تفرق و انعکاس امواج می‌شود [۴].

۳-۱- روش حل معادلات

در مدل بوسینسک معادلات با استفاده از روش تفاضل محدود و با متغیرهایی حل می‌گردند که در یک شبکه مستطیلی منظم تعریف می‌گردند. روند حل معادلات براساس تکنیک گام کوچک و با استفاده از الگوریتم ضمنی جهت‌دار[۴] می‌باشد. این الگوریتم در حل هر گام زمانی به گونه‌ای عمل می‌کند که بدون هیچ‌گونه تکرار، معادلات مومنتوم و پیوستگی در جهت x مشابه با جهت y حل شوند. نتیجه چنین روندی استفاده از یک سیستم بهینه به‌منظور حل معادلات می‌باشد. معادلات بوسینسک به‌صورت معادلات (۱) تا (۳) بیان می‌شوند [۴]:

(۱) معادله پیوستگی:
$$n\frac{\partial s}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=0$$

(۲) معادلهٔ مومنتوم در جهت X:
$$n\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+\frac{\partial R_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial R_{xy}}{\partial x}+F_x$$
$$n^2 gh\frac{\partial s}{\partial x}+n^2 p\left(\alpha+\beta\sqrt{\frac{p^2}{h^2}+\frac{q^2}{h^2}}\right)+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{h^2C^2}+n\psi_1=0$$

(۳) معادلهٔ مومنتوم در جهت Y:
$$n\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+\frac{\partial R_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial R_{xy}}{\partial y}+F_y$$
$$n^2 gh\frac{\partial s}{\partial y}+n^2 p\left(\alpha+\beta\sqrt{\frac{p^2}{h^2}+\frac{q^2}{h^2}}\right)+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{h^2C^2}+n\psi_2=0$$

در این روابط، S تراز سطح آب نسبت به سطح مبنا برحسب متر، p شار در جهت X برحسب m3/s/m، q شار در جهت Y برحسب m3/s/m، h عمق آب برحسب متر، n ضریب تخلخل[۵]، α ضریب مقاومت در محیط متخلخل در جریان‌های آرام و β ضریب مقاومت در محیط متخلخل در جریان‌های آشفته می‌باشند.

معادلات کلی بوسینسک برای حالتی حل می‌گردد که نسبت عمق آب به طول موج، کمتر از ۰/۲۲ باشد. این در حالی است در مواردی که نفوذ امواج با دامنه کوتاه به حوضچه بندر بررسی می‌گردد، این معیار تأمین نگشته و برای رفع این مسئله از معادلات توسعه یافته بوسینسک برای حل عددی استفاده می‌گردد که در این حالت، باید Deep Water Term را در نرم‌افزار فعال نمود.

برای طراحی مدل و انتخاب داده‌های ورودی به مدل شامل هیدروگرافی و پلان مورد نظر، مشخصات موج ورودی، مشخصات لایه تخلخل و لایه اسفنجی، مرز انتقال انرژی و غیره، مواردی در راهنمای نرم‌افزار توصیه شده که بایستی در استفاده از نرم‌افزار مدنظر قرار گیرد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۹-۱۱]:

(الف) حداکثر گام مکانی[۶] مدل، براساس حداقل طول موج مشاهده شده در مدل تعیین می‌گردد؛ به نحوی‌که این طول موج بایستی حداقل در ۸ شبکه محاسباتی شبیه‌سازی گردد.

(ب) حداکثر گام‌های زمانی مدل بایستی براساس میزان عدد کورانت محاسبه شود به نحوی که این عدد از ۱ تجاوز ننماید.

(پ) حداقل فاصله مرز ورود انرژی تا دهانه بندر، مطلوب‌تر است که در حدود ۵ الی ۶ برابر طول موج در نظر گرفته شود.

۳-۲- داده‌های ورودی لازم برای برپایی مدل

[4]- Alternating Direction Implicit (ADI) algorithm

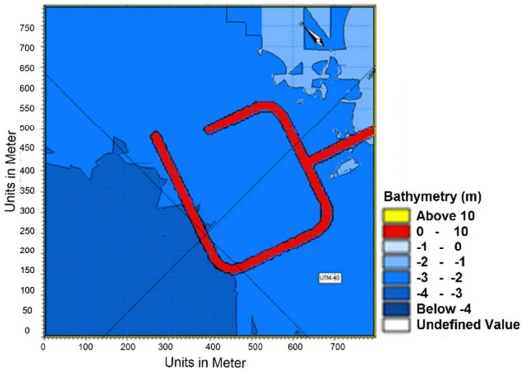
[5]- Porosity
[6]- Grid Spacing

اطلاعاتی که به عنوان ورودی در مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتنداز: اطلاعات حاصل از هیدروگرافی بستر، ضریب اصطکاک بستر (اختیاری)، انعکاس نسبی از سازه (تعریف تخلخل)، جذب امواج (تعریف لایه اسفنجی)، شرایط مرزی و اطلاعات زمانی. در ادامه هریک از موارد بیان شده، به تفکیک تشریح می‌گردند.

۳-۲-۱- هیدروگرافی بستر

برای تعیین هیدروگرافی بستر، نیاز است تا در ابتدا برداشت‌های میدانی با دقت مناسب صورت پذیرد و سپس با توجه به اطلاعات ثبت شده وضعیت هیدروگرافی منطقه تعیین گردد. بنابراین در ابتدا با توجه به نقشه‌های موجود، کلیه اطلاعات در نرم‌افزار وارد شدند. سپس با استفاده از روش درون‌یابی بیان داده‌های ورودی، وضعیت هیدروگرافی کل منطقه به‌دست آمد.

نقشه مورد استفاده جهت تولید داده‌ها و فایل هیدروگرافی مناسب در این مطالعه، متشکل از نقشه هیدروگرافی سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح اطراف بریزک با مقیاس ۱:۵۰۰۰ است، که دارای کیفیت خوبی برای مطالعات انتقال موج و انکسار می‌باشد [۱۲]. در شکل ۲ نتیجه حاصل نشان داده شده است. ابعاد سلول‌ها در این مدل‌سازی‌ها ۲×۲ متر است.

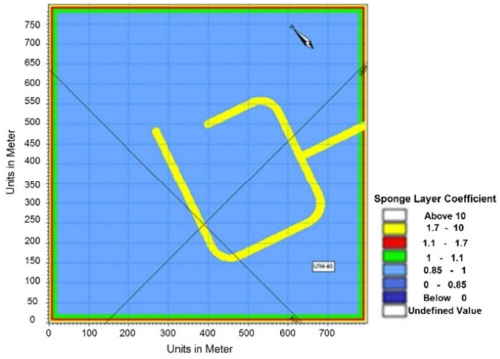


شکل ۲- فایل عمق‌سنجی استفاده شده در مطالعه حاضر

۳-۲-۲- جذب امواج (تعریف لایه اسفنجی)

استفاده از لایه اسفنجی (یا لایه جاذب) به عنوان یک روش کارآ و مؤثر عددی در جذب موج به ویژه موج‌های بوسینسک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این لایه‌ها در طول کلیه مرزهای بیرونی مدل استفاده می‌شوند تا کلیه انرژی‌های امواج منعکس شده از سازه‌های داخل مدل را جذب کنند. به علاوه، در سایر نقاطی که مشخصات امواج طراحی در آنها حائز اهمیت نمی‌باشد، (مانند پشت موج‌شکن‌ها) می‌توان از لایه‌های اسفنجی استفاده نمود.

در این مطالعه، از یک لایه اسفنجی به عنوان مرز کاملاً جاذب استفاده می‌شود. به طور کلی، روش انتخاب ضخامت لایه‌های اسفنجی تابعی از پریود یا طول موج طرح است. ضخامت لایه اسفنجی طوری تعیین شده است که طول موج مطالعه را در برگیرد. جذب انرژی توسط لایه اسفنجی انجام می‌گیرد. لایه‌های اسفنجی ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

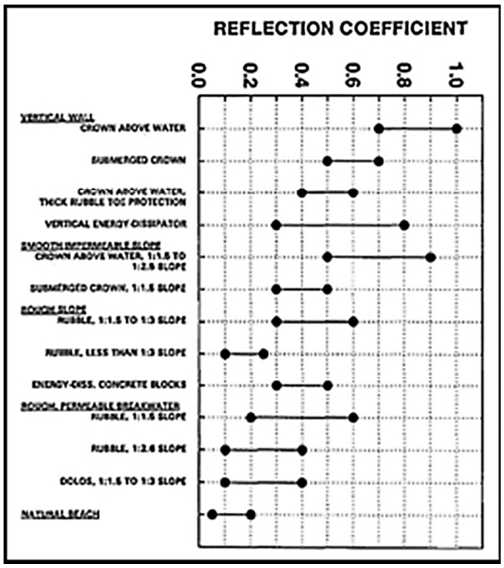


شکل ۳- لایه‌های اسفنجی استفاده شده در مدل

۳-۲-۳- انعکاس نسبی از سازه (تعریف لایه متخلخل)

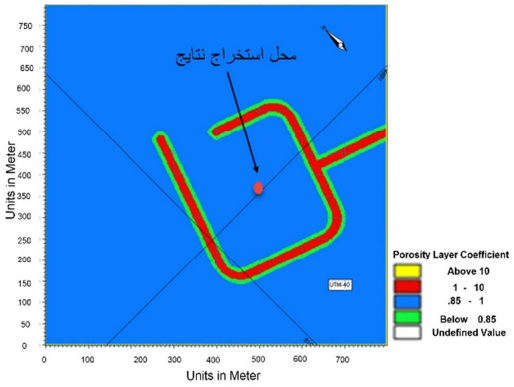
برای این‌که انعکاس نسبی امواج که در اثر برخورد آنها با بدنه موج‌شکن پدید می‌آید، در مدل لحاظ شود باید لایه متخلخلی گرداگرد مناطقی که احتمال وقوع چنین پدیده‌ای می‌رود، تعریف گردد. به منظور فعال شدن عملکرد این لایه و اعمال اثر آن بر انعکاس امواج، حداقل ضخامت لایه تخلخل باید برابر دست‌کم یک چهارم طول موج طرح باشد. بنابراین حداقل تعداد گره‌های لازم جهت تعریف این لایه در مدل برابر ۵ گره می‌باشد که در مدل لحاظ گردید. براساس توصیه‌های ارائه شده، ضریب این لایه‌ها برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است [۴ و ۹]. برای

تعیین میزان تخلخل، با توجه به کاربری بندر بریزک ضریب انعکاس موج‌شکن تعیین می‌گردد. شکل ۴ ضریب انعکاس سازه‌ها را براساس نوع کاربری آنها نشان می‌دهد.



شکل ۴- تعیین ضریب انعکاس سازه براساس کاربری [۴]

با استفاده از ضریب انعکاس به‌دست آمده برای مناطق مختلف بندر (شامل اسکله‌ها و موج‌شکن‌ها)، میزان تخلخل این مناطق تعیین گردید. نمونه‌ای از فایل لایه متخلخل که در این مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور بررسی حساسیت ضریب تفرق، نقطه‌ای در داخل حوضچه بندر به عنوان نقطه هدف، انتخاب شده و در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵- لایه‌های متخلخل استفاده شده در مدل

۳-۲-۴- شرایط مرزی

ورود امواج طرح به مدل جهت تحلیل هیدرودینامیک و انجام مطالعات تفرق به کمک شرایط مرزی صورت می‌پذیرد. امواج ممکن است در طول مرزهای باز یا در داخل مدل تعریف گردند.

در مرزهای باز انرژی موج (به عنوان مثال امواج با یک جهت شاخص) به صورت یک سری زمانی از ترازهای سطحی (تراز مرزی) یا فلاکس جریان عمود بر مرز (فلاکس مرزی) تعریف می‌گردد. با استفاده از روش تولید امواج داخلی[۷] این امکان وجود دارد که امواج تحت یک زاویه مشخص با مرزهای داخلی به سمت حوضچه حرکت کنند.

در تولید موج تابشی به مدل موارد اساسی زیر باید توسط کاربر تعیین گردد:

- نوع طیف ورودی که شامل سه طیف اصلی JONSWAP، Pierson_Moskowits و TMA است.
- ارتفاع موج ورودی (H_{mo})
- پریود موج ورودی (T_p)

۳-۲-۵- اطلاعات زمانی و شرایط پایداری مدل

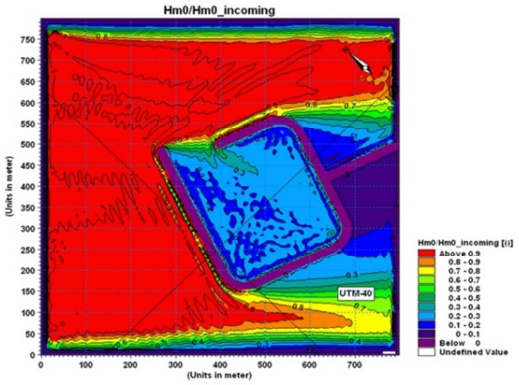
مدت زمان اجرای هر مدل باید به گونه‌ای باشد که موج تولیدی در مرز بتواند تمام طول مدل را پیموده و پس از انعکاس مجدداً به محل بازگردد. گام زمانی و نیز زمان مدل‌سازی براساس زمانی است که برای تولید امواج در نظر گرفته می‌شود. با توجه به توضیحات فوق، گام زمانی انتخاب شده برابر ۰/۱ ثانیه است که این انتخاب منجر به عدد کورانت برابر ۰/۳ در عمیق‌ترین نقطه مدل خواهد شد. مدت زمان اجرای مدل نیز برابر ۲۰ دقیقه (معادل ۱۲۰۰۰ گام زمانی) در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۶- داده‌های خروجی

پس از اجرای مدل ضرایب تفرق داخل حوضچه یعنی نسبت ارتفاع موج به ارتفاع موج تابشی را می‌توان

[7]- Internal Wave Generation

استخراج نمود. شکل ۶ نمونه‌ای از مدل اجرا شده را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نسبت ارتفاع موج داخل حوضچه

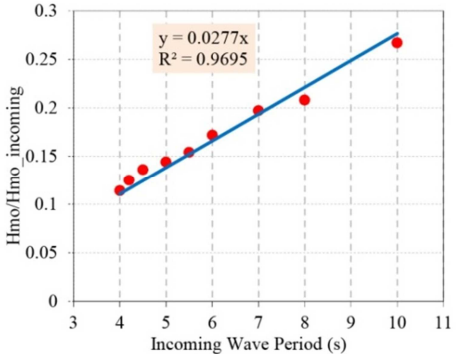
۴- بررسی تأثیر پریود موج ورودی بر ضریب تفرق داخل حوضچه

به منظور بررسی اثر پریود موج ورودی بر ضریب تفرق داخل حوضچه پریود موج ورودی از ۴ تا ۱۰ ثانیه طبق جدول ۱ تغییر داده شده است. در این حالت، ارتفاع موج ورودی ثابت و برابر ۱/۱ متر در نظر گرفته و برای تمام حالات امواج نامنظم با مشخصات ذکر شده به عنوان موج تابشی به مدل ارائه شده است. پس از اجرای مدل‌ها (۹ مدل به ازای ۹ پریود مختلف) در نقطه نشان داده در شکل ۵، ضرایب تفرق استخراج و در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است منظور از ضریب تفرق نسبت ارتفاع موج در محل به ارتفاع موج تابشی است.

در شکل ۷، تغییرات ضریب تفرق برحسب پریودهای مختلف موج ورودی ترسیم شده است.

جدول ۱- تغییرات ضریب تفرق به ازای پریودهای مختلف در تولید موج ورودی (ارتفاع موج ورودی ۱/۱ متر)

Hmo/Hmo_in	Incoming Wave Period, Tp (s)
۰/۱۱۴	۴/۰
۰/۱۲۵	۴/۲
۰/۱۳۶	۴/۵
۰/۱۴۴	۵/۰
۰/۱۵۴	۵/۵
۰/۱۷۲	۶/۰
۰/۱۹۷	۷/۰
۰/۲۰۸	۸/۰
۰/۲۶۷	۱۰



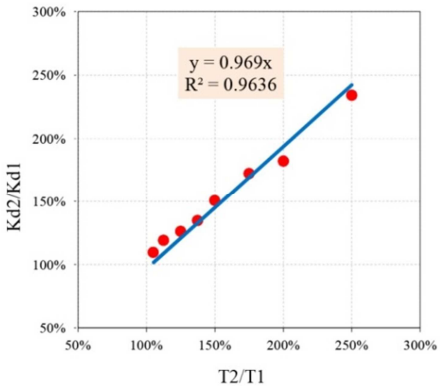
شکل ۷- نمودار تغییرات ضریب تفرق نسبت به پریود موج ورودی

همانگونه که مشخص است، با افزایش پریود، ضرایب تفرق افزایش می‌یابند. با توجه به مقدار ضریب R^2 رابطه خطی مناسبی بین داده‌ها برقرار است.

نمودار تغییرات ضریب تفرق براساس درصد تغییرات پریود موج ورودی در **Error! Reference source not found.**۸ ترسیم شده است. با توجه به رابطه خطی برازش داده شده، میزان افزایش در ضریب تفرق تقریبا ۰/۹۷ افزایش پریود موج ورودی است.

برای بررسی اثر ارتفاع موج ورودی بر ضرایب تفرق، ارتفاع موج ورودی از ۰/۷۵ متر تا ۲/۳ متر تغییر داده

شده و به ازای هریک موج نامنظم ورودی با پریود ثابت ۵/۵ ثانیه تولید و به مدل اعمال شده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات نسبت ضریب تفرق برحسب نسبت پریود موج ورودی

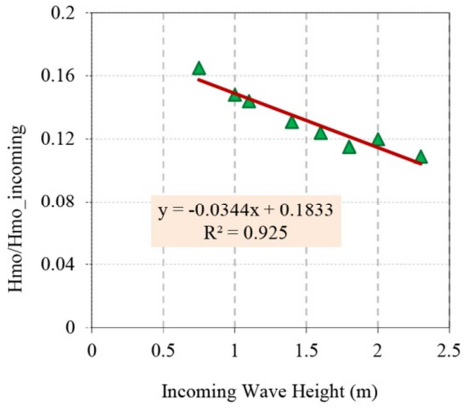
۵- بررسی تأثیر ارتفاع موج ورودی بر ضریب تفرق داخل حوضچه

سپس مدل برای تمام حالات (۸ مدل به ازای ۸ ارتفاع موج مختلف) اجرا و ضرایب تفرق استخراج شده است. جدول ۲ مقادیر ضرایب تفرق را به ازای ارتفاع‌های مختلف موج ورودی نشان می‌دهد.

در شکل ۹ تغییرات ضریب تفرق برحسب ارتفاع موج ورودی ترسیم شده است. همانطور که مشخص است با افزایش ارتفاع موج ورودی (به ازای پریود ثابت)، ضریب تفرق کاهش می‌یابد.

جدول ۲- تغییرات ضریب تفرق به ازای ارتفاع‌های مختلف موج ورودی (پریود ثابت ۵/۵ ثانیه)

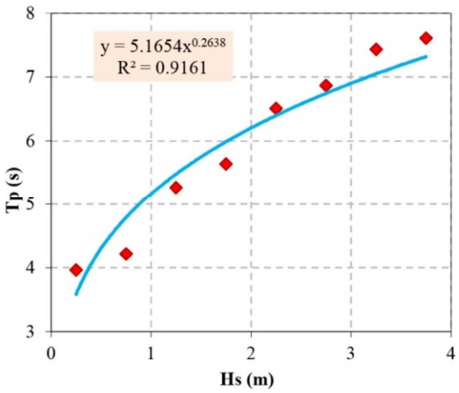
Hmo_in	Hmo/Hmo_in
۰/۷۵	۰/۱۶۵
۱/۰۰	۰/۱۴۸
۱/۱۰	۰/۱۴۴
۱/۴۰	۰/۱۳۱
۱/۶۰	۰/۱۲۴
۱/۸۰	۰/۱۱۵
۲/۰۰	۰/۱۲۰
۲/۳۰	۰/۱۰۹



شکل ۹- نمودار تغییرات ضریب تفرق نسبت به ارتفاع موج ورودی

در مدل‌های بیان شده، ارتفاع موج به ازای پریود موج ثابت (۵/۵ ثانیه) تغییر داده شد. در عمل، با تغییر ارتفاع موج، پریود نظیر آن نیز تغییر خواهد کرد. در این قسمت با تغییر ارتفاع موج ورودی، پریود نظیر آن نیز تغییر داده شده و سپس تمام مدل‌های یاد شده، مجدداً اجرا می‌شود.

برای تعیین پریود متناسب با هر ارتفاع موج، از روش همبستگی توانی ارائه شده توسط کمفیس بین ارتفاع موج شاخص (H_s) و پریود قله طیف موج (T_p) استفاده شده است [۱۳]. برای این منظور از داده‌های مطالعات پایش سواحل استان هرمزگان نقطه P1318 استفاده شده است. تغییرات ارتفاع موج برحسب پریود براساس روش کمفیس در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۰- رابطه بین پریود و ارتفاع امواج

بنابراین رابطه بین ارتفاع و پریود امواج به صورت رابطه شماره (۴) قابل بیان است:

$$T_p = 5.1654 H_s^{0.2638} \quad (۴)$$

براساس رابطه به‌دست آمده، به ازای ۸ ارتفاع موج مختلف، پریود نظیر آنها تعیین شده و سپس موج نامنظم نظیر هر حالت ساخته و به مدل اعمال شده است. پس از اجرای مدل‌ها ضریب تفرق برای حالت استخراج شده است. نتایج ضرایب تفرق به همراه ارتفاع و پریود موج ورودی درجدول ۳ ارائه شده است.

نمودار تغییرات ضریب تفرق برحسب ارتفاع موج ورودی در شکل ترسیم شده است.

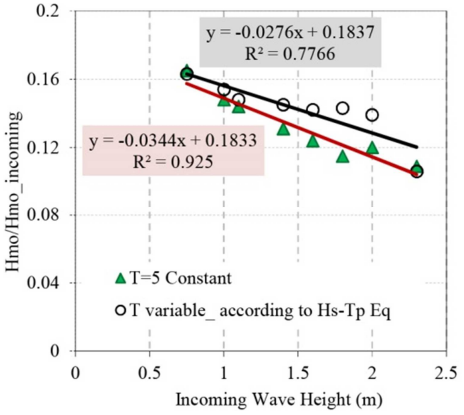
جدول ۳- تغییرات ضریب تفرق به ازای ارتفاع‌های مختلف موج ورودی (پریود ثابت ۵/۵ ثانیه)

Hmo	$T_p = 5.1654 H_{mo}^{0.2638}$	Hmo/Hmo_in
۰/۷۵	۴/۸	۰/۱۶۳
۱/۰	۵/۲	۰/۱۵۴
۱/۱	۵/۳	۰/۱۴۸
۱/۴	۵/۶	۰/۱۴۵
۱/۶	۵/۸	۰/۱۴۲
۱/۸	۶/۰	۰/۱۴۳
۲/۰	۶/۲	۰/۱۳۹
۲/۳	۶/۴	۰/۱۰۶

همانطور که مشهود است، با انتخاب پریود موج ورودی براساس ارتفاع موج، ضریب تفرق همچنان با افزایش ارتفاع موج کاهش می‌یابد، ولی میزان کاهش آن در مقایسه با حالتی که پریود امواج ورودی ثابت فرض شود، کمتر است.

۶- بررسی تأثیر نوع طیف موج ورودی بر ضریب تفرق داخل حوضچه

در این قسمت به منظور بررسی اثر نوع طیف ورودی بر ضرایب تفرق، سه طیف JONSWAP، PM و TMA مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات نسبت ضریب تفرق برحسب نسبت ارتفاع موج ورودی برای پریود متغیر و پریود ثابت

در تولید موج نامنظم ورودی به مدل، نوع طیف ورودی باید تعیین شود که در این قسمت موج ورودی با

ارتفاع‌های مختلف و پریود ۵/۵ ثانیه براساس سه نوع طیف ذکر شده تولید و به مدل اعمال شده است.

(الف) پارامترهای ورودی در طیف JONSWAP:

- ارتفاع مشخصه موج (H_{mo}) و پریود قله طیف (T_p)
- پارامترهای مشخص‌کننده شکل طیف که عبارتنداز:

σ_a=۰/۰۷ ، σ_b=۰/۰۹ و γ=۳/۳

- نوع موج ورودی Directional است.

(ب) پارامترهای ورودی در طیف PM:

- ارتفاع مشخصه موج (H_{mo}) و پریود میانگین (T_{02})
- نوع موج ورودی Directional است.

(پ) پارامترهای ورودی در طیف TMA:

- ارتفاع مشخصه موج (H_{mo}) و پریود قله طیف (Tp)
- پارامترهای مشخص‌کننده شکل طیف که عبارتنداز:

σ_a=۰/۰۷ ، σ_b=۰/۰۹ و γ=۳/۳

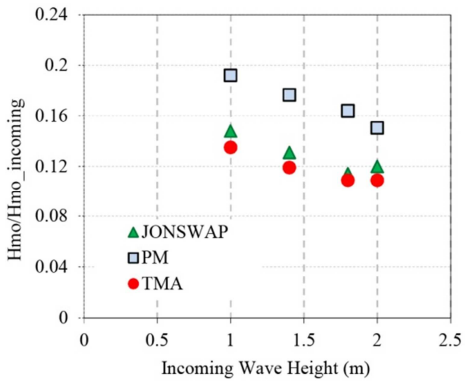
- نوع موج ورودی Directional است.

به ازای ۴ ارتفاع موج مختلف موج نامنظم ورودی براساس هر سه طیف ساخته شده و مدل‌ها (مجموعاً ۱۲ مدل به ازای ۴ ارتفاع موج و ۳ نوع طیف) اجرا گردیده است. ضرایب تفرق در جدول ۴ برای هر مدل نشان داده شده است.

جدول ۴- تغییرات ضریب تفرق به ازای طیف های مختلف در تولید موج ورودی

Hmo_in (m)	JONSWAP	PM	TMA
۱/۰۰	۰/۱۴۸	۰/۱۹۲	۰/۱۳۵
۱/۴۰	۰/۱۳۱	۰/۱۷۶	۰/۱۱۹
۱/۸۰	۰/۱۱۴	۰/۱۶۴	۰/۱۰۹
۲/۰۰	۰/۱۲۰	۰/۱۵۱	۰/۱۰۹

نمودار تغییرات ضریب تفرق برحسب نوع طیف در ارتفاع‌های مختلف موج ورودی در شکل ۱۲ ترسیم شده است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات نسبت ضریب تفرق نسبت به نوع طیف موج ورودی به ازای ارتفاع‌های مختلف موج ورودی

همانطور که نشان داده شده است، در تمام ارتفاع‌های موج ورودی، مقادیر ضریب تفرق حاصل طیف PM به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از دو طیف دیگر است. همچنین مقادیر ضریب تفرق حاصل از طیف JONSWAP اندکی بیشتر از طیف TMA است.

۷- نتیجه گیری

روش متداول مهندسین مشاور در بررسی آرامش حوضچه بنادر اجرای مدل بوسینسک برای موج با ارتفاع واحد است. علت این امر نیز آن است که برحسب گل‌موج مقابل دهانه بندر معمولاً لازم است تا آرامش حوضچه از چند جهت مختلف برای امواج ورودی بررسی شود.

بدیهی است هر جهت موج دارای ارتفاع و پریود مشخص است که لزوماً برای تمام جهات یکسان نیست. بنابراین لازم است مدل برای هر جهت با H_s و T_p نظیر آن اجرا شود. برای صرفه‌جویی در وقت و تسریع روند بررسی آرامش حوضچه، مهندسین مشاور مدل را برای هر جهت با ارتفاع واحد اجرا می‌کنند و سپس با فرض اینکه ضریب تفرق مقداری ثابت است، با ضرب ضریب تفرق حاصل در ارتفاع موج واقعی ورودی، مقدار ارتفاع موج داخل حوضچه تعیین می‌شود.

براساس نتایج این مطالعه، ضریب تفرق به ازای یک پریود مشخص، با افزایش ارتفاع موج کاهش می‌یابد. به

این معنی در صورتی که مدل مورد استفاده در بررسی آرامش حوضچه با ارتفاع واحد اجرا شده ولی ارتفاع امواج واقعی بیشتر از واحد باشد، در اینصورت نتایج حاصل از مدل با ارتفاع موج واحد در جهت اطمینان است. این امر اگرچه به لحاظ آرامش وضعیت بهتری برای حوضچه فراهم می‌کند، می‌تواند موجب تحمیل هزینه‌های اضافی بر طرح شود. چرا که تأمین آرامش بیشتر به معنی جلوگیری بیشتر از نفوذ امواج به داخل بندر است که این امر مستلزم تأمین همپوشانی بیشتر بازوها و در نتیجه صرف هزینه بیشتر برای افرایش طول بازوهای موج‌شکن است.

اگر ارتفاع امواج واقعی کمتر از واحد باشد، مقدار ارتفاع امواج داخل حوضچه، دست پایین تخمین زده می‌شود که این امر ممکن است درصد آرامش لازم برای حوضچه در طول سال (۹۲/۵ درصد از ایام سال) را دچار مشکل سازد.

نکته بسیار مهم دیگر، انتخاب پریود مناسب برای اجرای مدل BW است. براساس نتایج، افزایش پریود تأثیر ۰/۹۷ درصدی در ضرایب تفرق دارد. به عنوان مثال اگر پریود ورودی از ۵ ثانیه به ۶ ثانیه افزایش یابد (۲۰ درصد افرایش)، ضریب تفرق بیش از ۱۹ درصد افزایش می‌یابد. در این حالت نیز تخمین دست پایین پریود، موجب ایجاد مشکلات در آرامش حوضچه شده و تخمین دست بالای آن هزینه‌های اضافی بر طرح تحمیل می‌کند.

در مورد نوع طیف ورودی، طیف PM مقادیر دست بالایی به‌دست می‌دهد. با توجه به اختلاف ناچیز طیف TMA با JONSWAP، انتخاب طیف JONSWAP انتخاب مناسبی است.

مراجع

[1] The Overseas Coastal area Development Institute of Japan (OCDI), (2009). “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan”, Tokyo, Japan.

[2] Approach Channels, (1997), a Guide for Design, PIANC.

[3] Coastal Engineering Manual, (2001). US Army Corps of Engineers (USACE), Washington DC.

[4] Abott, M.B., Madsen, P.A. and Sorensen, O.R., (2001). “Scientific documentation of Mike21 BW- Boussinesq Wave Module” MIKE by DHI.

[5] Khalifa, M. A. (2009). “Calmness study for container handling ports with open basin systems using numerical modeling”, *Marine Scienes*, *20*(1), 69-88.

[6] Kim, Y. T., & Lee, J. I. (2011). “Construction of Fishery Port Considering Harbor Calmness, Water Circulation and Stability: Case Study”, *Journal of Coastal Research*, 641-645.

[7] Panigrahi, J. K., Padhy, C. P., & Murty, A. S. N. (2015). “Inner Harbour Wave Agitation using Boussinesq Wave Model”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, *7*(1), 70-86.

[8] Iranian Tide Tables (2005), National Cartographic Centre - Hydrographic Department.

[9] Jensen, C. H. (2007). *The Rock Manual- the Use of Rock in Hydraulic Engineering*, 2nd edition, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), London.

[10] Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2004). *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press.

[11] Coastal Engineering Research Center (US). (1984). *Shore Protection Manual*. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.

[12] Hydrographic map of Brizek area, scale 1: 5000.

[13] Kamphuis, J. W. (2010). “Introduction to Coastal Engineering and Management”, 2nd Edition, *30*, Advanced Series on Ocean Engineering, https://doi.org/10.1142/7021.