

## راستی آزمایی روابط مشخصات مکانیکی آیین‌نامه‌های معتبر موجود برای بتن سبک سازه‌ای

سبک‌سازی یکی از مباحث نوین در صنعت ساختمان است که روز به روز در حال گسترش می‌باشد. این فن‌آوری، منجر به کاهش وزن تمام شده ساختمان با استفاده از تکنیک‌های نوین ساخت مصالح جدید و صرفه‌جویی در زمان می‌شود؛ همچنین با توجه به لرزه‌خیزی ایران و لزوم سبک‌سازی در سازه‌ها، این بحث از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. این مقاله، مشخصات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسته را مورد بررسی قرار داده است. افزون بر این، با جمع‌آوری داده‌های مطالعات گذشته، با ایجاد بانک داده‌ها برای بتن سبک، نتایج آن را با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا (آمریکا، اروپا، استرالیا، کانادا و ژاپن) و روابط پیشنهاد شده توسط محققین دیگر برای بتن معمولی مقایسه کرده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که بتن سبک در محدوده مقاومت‌های فشاری رایج دارای مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسته کمتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد. همچنین براساس تحلیل‌های آماری و رگرسیون غیرخطی روابطی را برای مشخصات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای پیشنهاد داده است.

**واژگان کلیدی:** مشخصات مکانیکی، بتن سبک سازه‌ای، بتن معمولی، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مدول الاستیسته.

### مسعود سعادت‌خوش

دانشجوی کارشناسی ارشد  
زلزله، گروه مهندسی عمران،  
دانشگاه شهاب دانش.

پست الکترونیک:

Masoudsaadakhosh@gmail.com

### مهدی آرزومندی\*

استادیار، گروه مهندسی عمران،  
دانشگاه شهاب دانش.

پست الکترونیک:

arezoumandi@shahabdanesh.ac.ir

### سید هادی پورحسینی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه،  
گروه مهندسی عمران، دانشگاه  
شهاب دانش قم.

پست الکترونیک:

hadipurhoseini967@gmail.com

### ۱- مقدمه

دلایل استفاده از بتن سبک را می‌توان به کاهش بار وارده بر سازه و در نتیجه آن، کاهش نیروی مؤثر زلزله و دیگر بارهای جانبی، افزایش ظرفیت بار زنده سازه‌ها، افزایش سرعت اجرا، عایق صوتی و حرارتی بسیار مناسب برای استفاده در ساختمان‌هایی مانند بیمارستان‌ها و مدارس، مقاومت مطلوب در برابر آتش‌سوزی و ساخت قطعات پیش‌ساخته سبک بتنی به صورت سازه‌ای و غیرسازه‌ای نام برد.

بتن سبک بسته به نوع سنگدانه به سه نوع بتن سبک سازه‌ای (<sup>1</sup>LWC)، بتن سبک غیرسازه‌ای و بتن سبک با مقاومت متوسط تقسیم می‌شود. بتن سبک سازه‌ای بتن‌هایی با مقاومت فشاری بیش از ۱۷

بیشینه تاریخی کاربرد بتن سبک و مصالح سبک وزن، به روم باستان برمی‌گردد. پیشرفت در تولید بتن سبک در قرن بیستم آغاز گردید. در سال ۱۹۱۸، با استفاده از کوره دوار اقدام به منبسط کردن رس و شیل شد و بدینوسلیه سبک‌دانه‌ای مصنوعی تولید گردید که از آنها در ساخت بتن استفاده شد؛ این سبک‌دانه در جنگ جهانی اول برای ساخت کشتی نیز به کار گرفته می‌شد [۱].

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷، بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳.

(DOI): 10.22091/cer.2018.2951.1109 شناسه دیجیتال

<sup>1</sup>- Light Weight Concrete

روابط به دست آمده توسط پژوهشگران گذشته، در رابطه با بتن سبک بررسی و رابطه‌ای مناسب پیشنهاد گردد. طرح اختلاط موجود مطالعات گذشته در پیوست این تحقیق آورده شده است.

### ۳- مشخصات مکانیکی

در این بخش، نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته بتن‌های سبک در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه که انواع سبک‌دانه‌های پومیس، لیکا، اسکوریا، شل، آرجکس، آریلتا، سنگ لوح و رسی را شامل می‌شود؛ با آیین‌نامه‌های معتبر دنیا و روابط پیشنهادی محققین گذشته مقایسه شده است.

#### ۳-۱- مقاومت کششی

در بخش اول، مقاومت کششی دو نیم شدن<sup>۶</sup>، با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا، روابط محققین و بانک داده‌های مطالعات گذشته مقایسه می‌شود.

#### ۳-۱-۱- مقایسه با آیین‌نامه‌های معتبر

در جدول ۱، روابط مقاومت کششی برای بتن معمولی (CC<sup>۷</sup>) در آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن، اشتو<sup>۸</sup> و CEB-FIP نشان داده شده است.

با مطالعه بر روی ده‌ها مقاله و بررسی داده‌های موجود در مقالات، میانگین نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین‌نامه‌ای برای آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن، اشتو و CEB-FIP به ترتیب برابر با ۱/۱۱، ۱/۴۷، ۱/۴۵، ۱/۰۰ و ۱/۱۸ می‌باشد. همچنین روابط آیین‌نامه آمریکا و اروپا به ترتیب برای ۶۳، ۷۹، روابط آیین‌نامه‌های استرالیا و ژاپن حدود ۹۰ و آیین‌نامه AASHTO و CEB-FIP برای ۶۰ و ۷۵ درصد داده‌های

مگاپاسکال و وزن مخصوص ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند [۱].

سنگدانه‌هایی که شرایط استاندارد ASTM-C330 [۲] را برآورده می‌کنند و برای ساخت بتن سبک سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند را می‌توان به دو نوع طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد؛ از سبک‌دانه‌های طبیعی می‌توان به پومیس، اسکوریا و دیاتومه اشاره کرد؛ پومیس و اسکوریا منشأ آذرین و آتشفشانی دارند و دیاتومه از بقایای پوسته آهکی جانوران دریایی تشکیل شده است؛ سبک‌دانه‌های مصنوعی از رس، شیل، سنگ لوح، پرلیت، ورمیکولیت، خاکستر سوخت پودر شده، روباره کوره آهن‌گدازی، شیشه، ذرات چوب و پلاستیک ساخته می‌شوند [۳].

در بتن سبک سازه‌ای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری به وزن مخصوص بتن از اهمیت بیشتری برخوردار است. به علت اثرات نسبت مقاومت فشاری به وزن مخصوص در ابعاد سازه‌ای، افزایش این نسبت مؤثرتر خواهد بود. طرح اختلاط بتن سبک برای کاربردهای سازه‌ای بسیار پیچیده است؛ زیرا به نوع سنگدانه سبک بستگی دارد. عموماً سنگدانه‌ها ۷۰ تا ۸۰ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند و به این علت که نسبت حجم بیشتری اشغال می‌کنند، تأثیر بیشتری روی خصوصیات مکانیکی بتن دارند. از آنجاکه اثر و نقش خمیر سیمان و سنگدانه سبک در بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی متفاوت است، بنابراین در بتن سبک شناسایی خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌های سبک اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت [۴].

### ۲- روش پژوهش

در این پژوهش، تلاش بر این است تا با مقایسه تعداد بسیاری از آزمایش‌های انجام شده توسط محققین، مشخصات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای را با آیین‌نامه‌های معتبر حاضر (آمریکا<sup>۲</sup>، اروپا<sup>۳</sup>، کانادا، استرالیا<sup>۴</sup> و ژاپن<sup>۵</sup>) و

2- ACI 318

3- EC 2

4- AS 3600

5- JSCE

6- Tensile splitting strength

7- Conventional Concrete

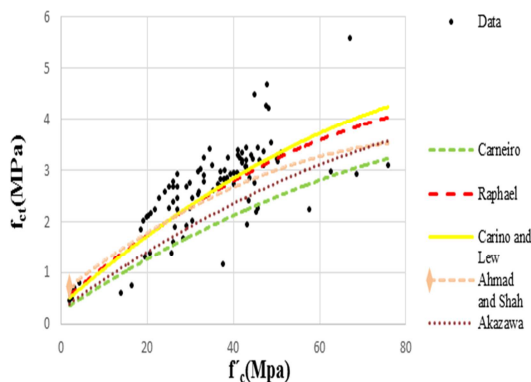
8- AASHTO

با بررسی بیشتر روابط (۷) تا (۱۱)، به ترتیب ۱۵، ۱۰، ۲۵، ۲۳ و ۲۱ درصد داده‌ها، مقاومتی کمتر از مقاومت محاسبه شده این روابط دارند.

جدول ۲- روابط مقاومت کششی محققین برای بتن معمولی

| شماره رابطه | رابطه مقاومت کششی              | محقق                        |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|
| ۷           | $f_{ct} = 0.209(f'_c)^{0.73}$  | Akazawa [۱۸]                |
| ۸           | $f_{ct} = 0.185(f'_c)^{0.735}$ | Carneiro [۱۹] and Barcellos |
| ۹           | $f_{ct} = 0.272(f'_c)^{0.71}$  | Carino [۲۰] and Lew         |
| ۱۰          | $f_{ct} = 0.313(f'_c)^{0.667}$ | Raphael [۲۱]                |
| ۱۱          | $f_{ct} = 0.46(f'_c)^{0.55}$   | Ahmad [۲۲] and Shah         |

شکل ۲، نتایج آزمایشگاهی را با روابط پیشنهادی محققین گذشته، مقایسه می‌کند.



شکل ۲- مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای با روابط محققین گذشته

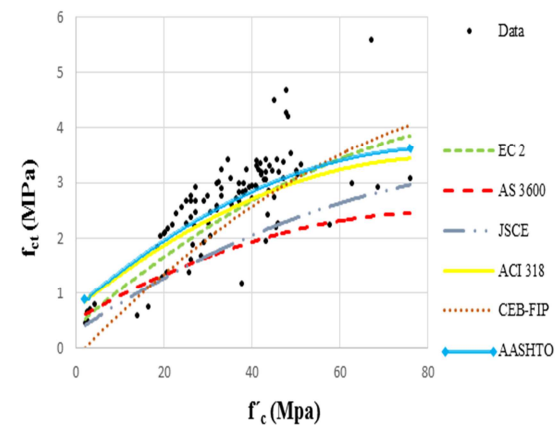
۳-۱-۳- مقایسه با بانک داده‌های مطالعات گذشته

شکل ۳، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای، را با انبوه داده‌های مطالعات گذشته بتن معمولی مقایسه می‌کند [۱۱-۱۴ و ۲۳]. با تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) و با استفاده از نرم‌افزار Minitab15 بر روی این داده‌ها منحنی‌های کران پایین و بالای ۹۵ درصد ترسیم شده است [۲۴]. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که ۹۳٪ داده‌های

مطالعات گذشته محافظه‌کارانه هستند (شکل ۱) [۵-۱۱].

جدول ۱- روابط مقاومت کششی آیین‌نامه‌ها برای بتن معمولی

| شماره رابطه | رابطه مقاومت کششی  | آیین‌نامه    |
|-------------|--|--------------|
| ۱           | $f_{ct} = 0.56(f'_c)^{0.5}$                                      | ACI 318 [۱۲] |
| ۲           | $f_{ct} = 0.3(f'_c)^{\frac{2}{3}}$                               | EC 2 [۱۳]    |
| ۳           | $f_{ct} = 0.4(f'_c)^{0.5}$                                       | AS 3600 [۱۴] |
| ۴           | $f_{ct} = 0.23(f'_c)^{\frac{2}{3}}$                              | JSCE [۱۵]    |
| ۵           | $f_{ct} = 0.59(f'_c)^{0.5}$                                      | AASHTO [۱۶]  |
| ۶           | $f_{ct} = 1.56 \left[ \frac{f'_c - 8}{10} \right]^{\frac{2}{3}}$ | CEB-FIP [۱۷] |



شکل ۱- مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای با روابط آیین‌نامه‌ها

۳-۱-۳- مقایسه با روابط محققین گذشته

در این بخش، نتایج به دست آمده برای مقاومت کششی بتن سبک از مطالعات گذشته در مراجع [۵-۱۱] با روابط محققینی از جمله آکاوا<sup>۹</sup>، کارنیرو و بارسلوز<sup>۱۰</sup>، کارینو و لیو<sup>۱۱</sup>، رافائل<sup>۱۲</sup> و احمد و شاه<sup>۱۳</sup> که در جدول ۲ نشان داده شده است، مقایسه می‌شود.

با توجه به جدول ۲، میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط مقاومت کششی محققین گذشته به ترتیب برابر با ۱/۲۹، ۱/۴۴، ۱/۰۶، ۱/۰۷ و ۱/۰۸ می‌باشد؛

۹- Akazawa

۱۰- Carneiro and Barcellos

۱۱- Carino and Lew

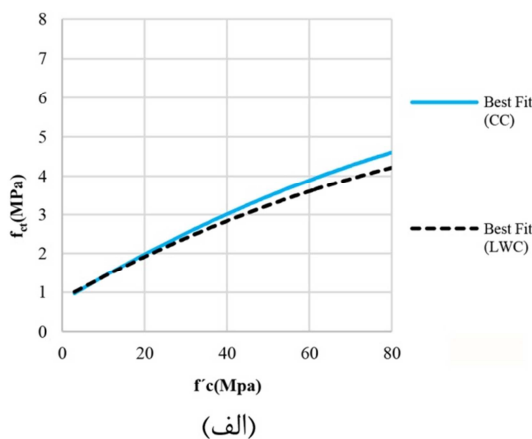
۱۲- Raphael

۱۳- Ahmad and Shah

الف) به این نتیجه می‌رسیم که در بهترین خط برازش شده، تقریباً داده‌های بتن معمولی در همه مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با بتن سبک سازه‌ای، دارند. در شکل ۴ الف مشخص است که شیب بهترین خط برازش شده به داده‌های مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای کمتر از بتن معمولی می‌باشد، در نتیجه بتن سبک سازه‌ای مقاومت کششی کمتری دارد. همچنین بعد از بررسی داده‌ها و تحلیل‌های آماری (شکل ۴ ب) با نرم‌افزار Minitab15 رابطه پیشنهادی مقاومت کششی برای بتن سبک سازه‌ای مطابق با رابطه (۱۲) پیشنهاد می‌شود:

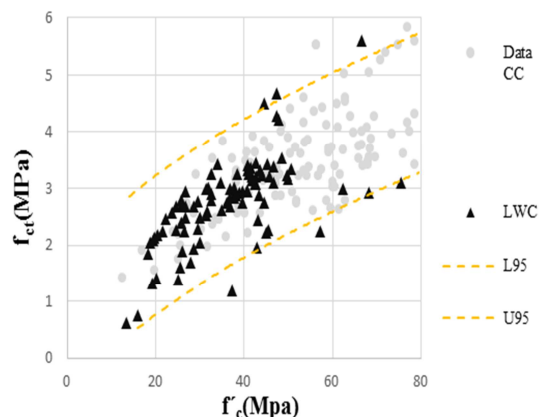
$$f_{ct} = a (f'_c)^b \quad (12)$$

$$f_{ct} = 0.36 (f'_c)^{0.56}$$



(الف)

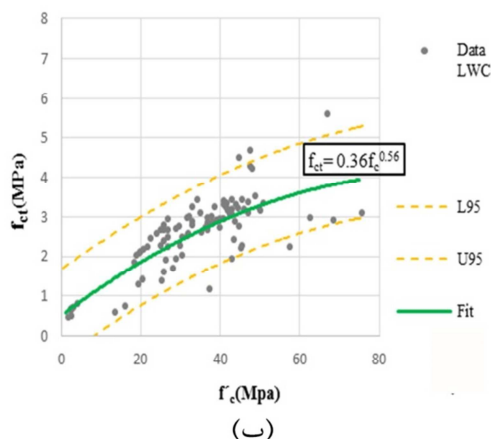
مقاومت کششی بتن سبک در این محدوده ۹۵٪ داده‌های بتن معمولی قرار دارد.



شکل ۳- مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای با بانک داده‌های بتن معمولی

۳-۱-۴- تحلیل و آنالیز و رابطه پیشنهادی برای مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای

با بررسی بر روی نتایج خط برازش (رگرسیون غیرخطی) داده‌های بتن سبک سازه‌ای و همچنین بهترین خط برازش شده بر روی داده‌های بتن معمولی (شکل ۴



(ب)

شکل ۴- تحلیل آماری خط برازش (رگرسیون غیرخطی) مقاومت کششی، الف) مقایسه بتن معمولی و بتن سبک و ب) بتن سبک

گذشته [۵-۷، ۹-۱۱ و ۲۵] با روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا و اشته مقایسه می‌شود. جدول ۳ روابط مقاومت خمشی این آیین‌نامه‌ها را برای بتن معمولی نشان می‌دهد.

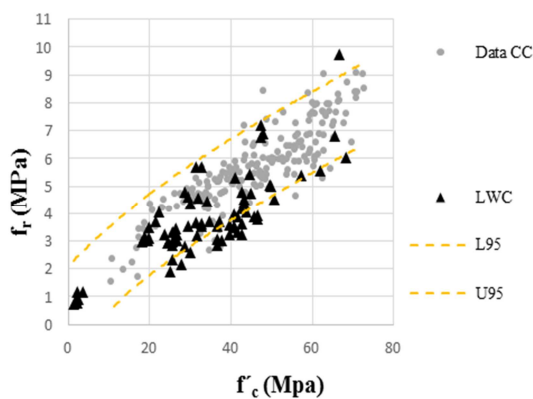
با بررسی داده‌های مربوط به مقاومت خمشی بتن سبک سازه‌ای در آیین‌نامه‌های بیان شده، میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین‌نامه‌ای برای آیین‌نامه‌های

### ۳-۲- مقاومت خمشی

در این بخش، مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) بتن سبک با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا و بانک داده‌های مطالعات گذشته مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱- مقایسه با آیین‌نامه‌های معتبر در این بخش، نتایج آزمایش‌های خمشی مطالعات

۳-۲-۳- تحلیل، آنالیز و رابطه پیشنهادی برای مقاومت خمشی بتن سبک سازه‌ای  
با بررسی بر روی نتایج مقاومت خمشی، محدوده ۹۵٪ خط برازش (رگرسیون غیرخطی) و همچنین بهترین خط برازش شده بر روی داده‌های بتن معمولی و بتن سبک سازه‌ای (شکل ۷ الف) مشهود است که در بهترین خط برازش شده، داده‌های با مقاومت فشاری کمتر از ۱۰ مگاپاسکال بتن معمولی، مقاومت خمشی تقریباً یکسان در مقایسه با بتن سبک سازه‌ای دارد.



شکل ۶- مقایسه نتایج مقاومت خمشی بتن سبک سازه‌ای علاوه بر این، شیب بهترین خط برازش شده بر داده‌های بتن سبک سازه‌ای در ازای مقاومت فشاری یکسان نسبت به بتن معمولی کمتر می‌باشد؛ در نتیجه بتن سبک سازه‌ای مقاومت خمشی کمتری دارد. با بررسی آماری داده‌های مقاومت خمشی بتن سبک (شکل ۷ ب) با نرم‌افزار Minitab15 معادله پیشنهادی برای مقاومت خمشی به شرح زیر می‌باشد:

$$f_r = a (f'_c)^b \quad (17)$$

$$f_r = 0.5 (f'_c)^{0.6}$$

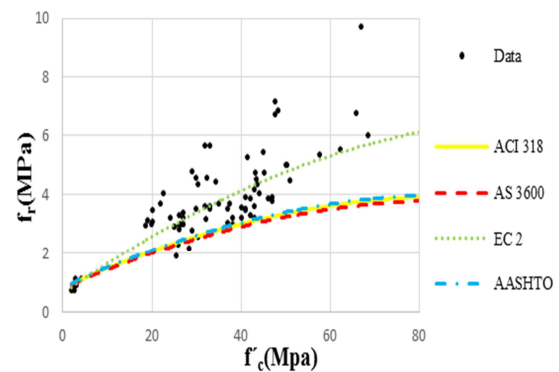
### ۳-۳- مدول الاستیسیته

در این بخش، مدول الاستیسیته بتن سبک سازه‌ای با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا، روابط محققین گذشته و بانک داده‌های بتن معمولی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مطالعات گذشته، کاهش مدول الاستیسیته بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی را گزارش کرده‌اند [۱۰،

آمریکا، استرالیا و اشتو ۱/۴۰ و برای اروپا ۱/۰۵ می‌باشد. همچنین روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، استرالیا و اشتو حدود ۹ درصد و آیین‌نامه اروپا ۴۰ درصد غیرمحافظة کارانه می‌باشد. شکل ۵، نتایج آزمایشگاهی را با روابط این آیین‌نامه‌ها مقایسه می‌کند.

جدول ۳- روابط مقاومت خمشی آیین‌نامه‌ها برای بتن معمولی

| شماره رابطه | رابطه مقاومت خمشی  | آیین‌نامه   |
|-------------|--|-------------|
| ۱۳          | $f_r = 0.62(f'_c)^{0.5}$                                 | ACI 318 [۵] |
| ۱۴          | $f_r = \text{Max}(1.6 - \frac{h}{200}) * f_{ct}, f_{ct}$ | EC 2 [۶]    |
| ۱۵          | $f_r = 0.6(f'_c)^{0.5}$                                  | AS 3600 [۷] |
| ۱۶          | $f_r = 0.63(f'_c)^{0.5}$                                 | AASHTO [۹]  |

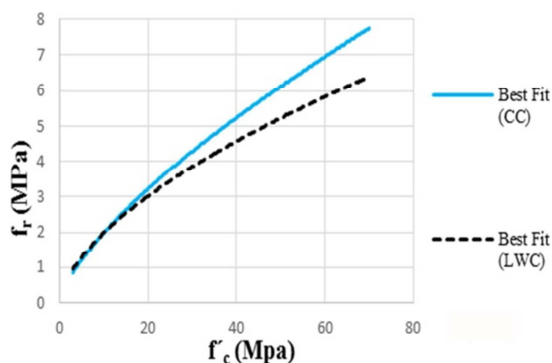


شکل ۵- مقایسه نتایج مقاومت خمشی بتن سبک سازه‌ای با روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا و اشتو

### ۳-۲-۳- مقایسه با بانک داده‌های مطالعات گذشته

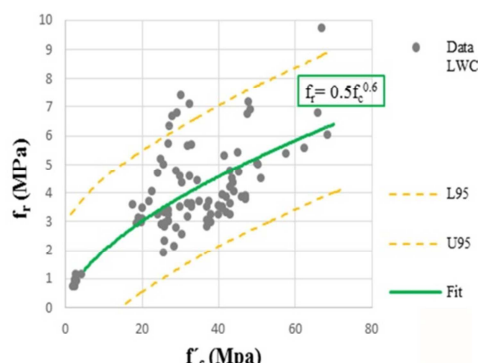
شکل ۶، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت خمشی بتن سبک [۵-۷، ۹-۱۱ و ۲۵] را با انبوه داده‌های مطالعات گذشته بتن معمولی [۲۳] مقایسه می‌کند. تحلیل‌های آماری انجام شده توسط نرم‌افزار Minitab15 بر روی این داده‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی منجر به ترسیم منحنی‌های کران پایین و بالای ۹۵ درصد این داده‌ها مطابق شکل ۶ می‌شود. بررسی‌های آماری حاکی از آن است که ۲۷٪ داده‌ها خارج از محدوده ۹۵٪ داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

معمولی آیین‌نامه ACI را با کاهش دادن ضرایب آن، پیشنهاد دادند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد [۲۹].



(الف)

۱۱ و ۲۶-۳۱]. محققین با بررسی آزمایشگاهی مدول الاستیسیته بتن سبک، مدل رابطه مدول الاستیسیته بتن

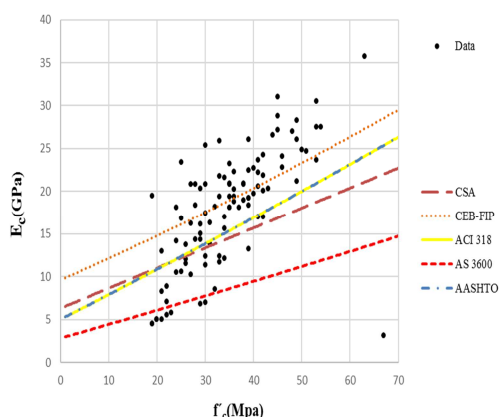


(ب)

شکل ۷- تحلیل آماری خط برازش (رگرسیون غیرخطی) مقاومت خمشی، (الف) مقایسه بتن معمولی و بتن سبک سازه‌ای (ب) بتن سبک

۳-۳-۱- مقایسه با آیین‌نامه‌های معتبر در این قسمت، نتایج با روابط آیین‌نامه‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جدول ۴، روابط مدول الاستیسیته آیین‌نامه‌ها برای بتن معمولی را نشان می‌دهد.

۳-۳-۱- مقایسه با آیین‌نامه‌های معتبر در این قسمت، نتایج با روابط آیین‌نامه‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جدول ۴، روابط مدول الاستیسیته آیین‌نامه‌ها برای بتن معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقایسه نتایج مدول الاستیسیته بتن سبک با روابط آیین‌نامه

جدول ۴- روابط مدول الاستیسیته آیین‌نامه‌ها برای بتن معمولی

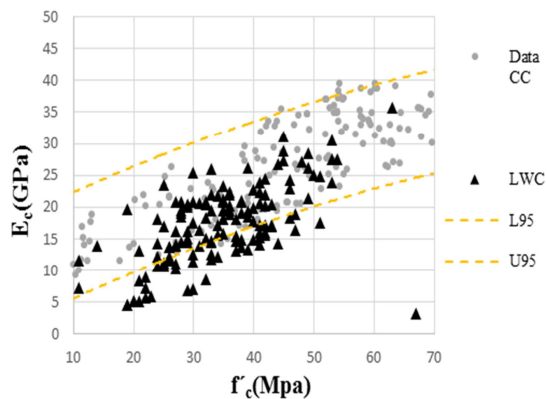
| شماره رابطه | رابطه مدول الاستیسیته   | آیین‌نامه    |
|-------------|---|--------------|
| ۱۸          | $E_c = 0.043 * \rho^{1.5} (f'_c)^{0.5}$                         | ACI 318 [۱۲] |
| ۱۹          | $E_c = \rho^{1.5} * (0.024 * (f'_c + 0.12)^{0.5})$              | AS 3600 [۱۳] |
| ۲۰          | $E_c = 3300 f'_c \rho^{0.5} + 6900 * (\frac{\rho}{2300})^{0.5}$ | CSA [۲۲]     |
| ۲۱          | $E_c = 0.043 * K_1 * \rho^{1.5} (f'_c)^{0.5}$                   | AASHTO [۱۶]  |
| ۲۲          | $E_c = (\frac{\rho}{2200})^2 * 10000 (f'_c + 8)^{\frac{1}{3}}$  | CEB-FIP [۱۷] |

۳-۳-۲- مقایسه با روابط محققین گذشته جدول ۵، روابط مدول الاستیسیته برای بتن معمولی را نشان می‌دهد. در این بخش، این روابط با نتایج مطالعات در مراجع [۱۰، ۱۱ و ۲۶-۳۱] مقایسه می‌شود. میانگین ضرایب نتایج آزمایش به روابط (۲۳) تا (۲۵) به ترتیب ۱/۱۲، ۰/۸۵ و ۱/۲۱ به دست آمده است. شکل ۹ به خوبی نشان می‌دهد که در روابط جدول ۵، به ترتیب ۳۱، ۶۸ و ۲۵ درصد داده‌ها، مدول الاستیسیته کمتری نسبت به روابط محاسبه شده دارند.

با مطالعه و بررسی داده‌های مدول الاستیسیته موجود در مقالات [۱۰، ۱۱ و ۲۶-۳۱]، میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین‌نامه‌ای برای روابط (۱۸) تا (۲۲) به ترتیب ۱/۱۳، ۱/۱۸، ۱/۱۳، ۲/۰۳ و ۰/۹۰ به دست آمده است.

در شکل ۸ مشخص است روابط آیین‌نامه‌های

بتن سبک خارج از محدوده ۰.۹۵٪ بتن معمولی می‌باشد.



شکل ۱۰- نتایج تحلیل آماری مدول الاستیسیته بتن سبک سازه‌ای و بتن معمولی

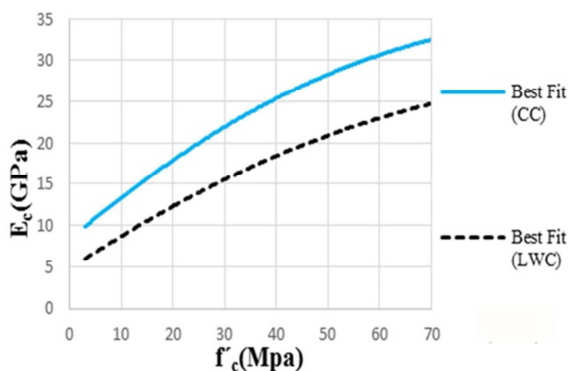
### ۳-۳-۴- تحلیل و آنالیز و رابطه پیشنهادی برای مدول الاستیسیته بتن سبک

با بررسی بر روی نتایج مدول الاستیسیته، محدوده ۰.۹۵٪ خط برازش (رگرسیون غیرخطی) و همچنین بهترین خط برازش شده بر روی داده‌های بتن معمولی و بتن سبک (شکل ۱۱ الف) مشهود است که در بهترین خط برازش شده داده‌ها با مقاومت فشاری یکسان، مدول الاستیسیته بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی کمتر می‌باشد.

علاوه بر آن، بعد از تحلیل و بررسی داده‌های بتن سبک (شکل ۱۱ ب) از نرم‌افزار Minitab15 رابطه پیشنهادی برای مدول الاستیسیته به شرح زیر می‌باشد:

$$E_c = a(f'_c)^b(\rho)^c \quad (26)$$

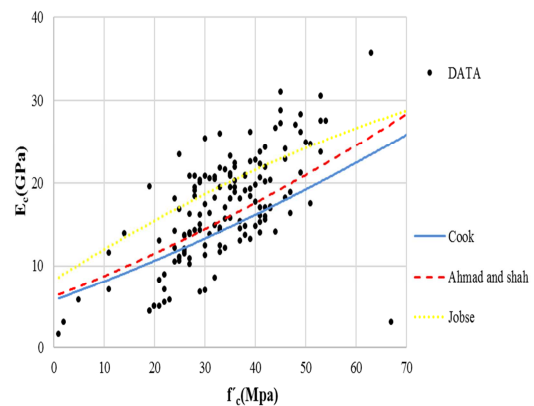
$$E_c = 0.112(f'_c)^{0.11}(\rho)^{0.33}$$



(الف)

### جدول ۵- روابط مدول الاستیسیته برای بتن معمولی

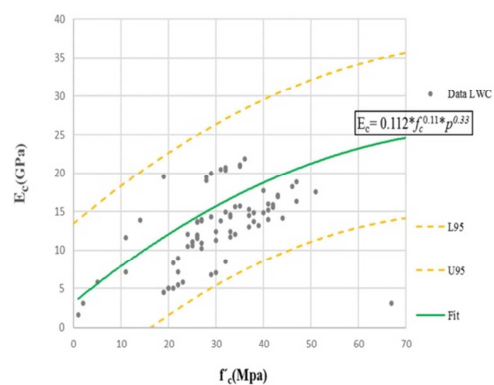
| شماره رابطه | رابطه مدول الاستیسیته                                     | محقق                    |
|-------------|---|-------------------------|
| ۲۳          | $E_c = 3.38 * 10^{-5} \lambda^{2.5} (\sqrt{f'_c})^{0.65}$ | Ahmad and Shah [۲۲]     |
| ۲۴          | $E_c = 0.103 \lambda^{1.5} (\sqrt{f'_c})^{0.5}$           | Jobse and Moustafa [۲۳] |
| ۲۵          | $E_c = 3.22 * 10^{-5} * \rho^{2.5} (f'_c)^{0.315}$        | Cook [۲۴]               |



شکل ۹- مقایسه نتایج مدول الاستیسیته بتن سبک سازه‌ای با روابط محققین گذشته

### ۳-۳-۳- مقایسه با بانک داده‌های مطالعات گذشته

نتایج حاصل از آزمایش‌های مدول الاستیسیته بتن سبک سازه‌ای [۱۰، ۱۱ و ۲۷-۳۲] در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار Minitab15 بهترین خط و کران بالا و پایین محدوده ۰.۹۵٪ برای بانک داده‌های بتن معمولی [۲۴] ترسیم گردیده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌گردد، تقریباً ۰.۳۸٪ داده‌های مدول الاستیسیته



(ب)

شکل ۱۱- تحلیل آماری خط برازش (رگرسیون غیرخطی) مدول الاستیسیته (الف) مقایسه بتن معمولی و بتن سبک، (ب) بتن سبک

## ۴- نتیجه‌گیری

(رگرسیون غیرخطی) به داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

۶- در بهترین خط برازش شده برای داده‌های مقاومت خمشی به ازای مقاومت فشاری بیشتر از ۱۰ مگاپاسکال شیب نمودار بتن سبک نسبت به بتن معمولی کمتر می‌باشد؛ در نتیجه بتن سبک مقاومت خمشی کمتری دارد. برای مقاومت فشاری کمتر از ۱۰ مگاپاسکال نتایج بسیار نزدیک به هم می‌باشد.

۷- روابط مدول الاستیسیته آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، برای ۳۰ تا ۶۰ درصد داده‌ها غیرمحافظة‌کارانه می‌باشد.

۸- نتایج تحلیل آماری برای مدول الاستیسیته بتن سبک نشان می‌دهد که تقریباً ۳۵ درصد داده‌ها خارج از محدوده ۹۵٪ بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیرخطی) به داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

۹- در بهترین خط برازش شده برای داده‌های مدول الاستیسیته شیب نمودار بتن سبک در ازای مقاومت فشاری یکسان نسبت به بتن معمولی بیشتر می‌باشد؛ در نتیجه بتن سبک مدول الاستیسیته کمتری دارد.

۱- روابط مقاومت کششی آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن، ایتالی و CEB-FIP به ترتیب برای ۶۳، ۷۹، ۹۰، ۹۰، ۶۰ و ۷۵ درصد داده‌ها محافظه‌کارانه می‌باشد.

۲- نتایج تحلیل آماری برای مقاومت کششی بتن سبک سازه‌ای نشان می‌دهد که تقریباً ۷ درصد داده‌ها خارج از محدوده ۹۵٪ بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیرخطی) به داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

۳- در بهترین خط برازش شده برای داده‌های مقاومت کششی شیب نمودار بتن سبک در ازای مقاومت فشاری یکسان نسبت به بتن معمولی کمتر می‌باشد، در نتیجه بتن سبک مقاومت کششی کمتری دارد.

۴- با بررسی مقاومت خمشی آیین‌نامه‌های آمریکا، استرالیا و ایتالی حدود ۹ درصد و اروپا حدود ۴۰ درصد داده‌ها، مقاومت کمتری نسبت به مقادیر محاسبه شده از روابط این آیین‌نامه‌ها دارند.

۵- نتایج تحلیل آماری برای مقاومت خمشی بتن سبک نشان می‌دهد که تقریباً ۲۷ درصد داده‌ها خارج از محدوده ۹۵٪ بهترین خط برازش شده

## مراجع

- [1] ACI Committee 213, "Guide for Structural Lightweight aggregate Concrete", *Journal of the American Concrete Institute* 64, 1967(8), 433-469.
- [2] ASTM, Standard Specification for Lightweight aggregate Concrete for Structural Concrete, Designation: C330-99, 1-4
- [3] Melby, K., Jordet, E. A., & Hansvold, C. (1996). "Long-span bridges in Norway constructed in high-strength LWA concrete", *Engineering structures*, 18(11), 845-849.
- [4] Chi, J. M., Huang, R., Yang, C. C., & Chang, J. J. (2003). "Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete", *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 197-205.
- [5] Alexandre, J., & Nogueira, R. (2014). "Tensile Strength of Structural Expanded Clay Lightweight Concrete Subjected to Different Curing Conditions", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1780-1791
- [6] Chindaprasirt, P., Nuaklong, P., Zaetang, Y., Sujumnongtokul, P., & Sata, V. (2015). "Mechanical and thermal properties of recycling lightweight pervious concrete", *Arabian journal for science and engineering*, 40(2), 443-450.



- [7] Regin, J. J., Vincent, P., & Ganapathy, C. (2017). "Effect of Mineral Admixtures on Mechanical Properties and Chemical Resistance of Lightweight Coconut Shell Concrete", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(3), 957-971.
- [8] Tanyildizi, H., & Coskun, A. (2008). "The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash", *Construction and Building Materials*, 22(11), 2269-2275.
- [9] Beigi, M., Hoseinian, B., & Shafigh, P. (2007). "High strength lightweight concrete whit lightweight aggregate, filler and silica fume", *Engineering Department Journal (Civil engineering)*, 19(1), 127-134.
- [10] Entezari, A., & Esmaeili, J. (2010). "Mechanical properties of structural lightweight concrete", *Civil and Environmental Engineering journal*, 40(2), 1-12.
- [11] Baghi, M., & Yazdani, M. (2012). "Mechanical properties of structural lightweight concrete using artificial lightweight aggregate", *Concrete research journal*, 6(2), 39-46.
- [12] American Concrete Institute ACI Committee. (2013). "Building code requirements for structural concrete ACI 318-13 and commentary 318R-13", Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- [13] European Committee for Standardization. Eurocode No. 2, (2005). "Design of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings".
- [14] Standards Australia. (2009). "Concrete structures", AS 3600, Sydney, Australia
- [15] Japan Society of Civil Engineers, "Standard Specification for Concrete Structure" Japanese Society of Civil Engineering No. 15, Tokyo, Japan.
- [16] AASHTO. Interim bridge design specifications and commentary. Washington (DC): American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO); 2006.
- [17] CEB-FIP. High-strength concrete state of the art report. London: Thomas Telford; 1990.
- [18] Akazawa, T. (1953). Tension Test Methods for Concretes, International Union of Testing and Research Laboratories for-Materials and Structures (RILEM). *Paris, Bulletin*, 16, 11-23.
- [19] Carneiro, F. L. B. (1953). Concrete Tensile Strength, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM). *Paris, Bulletin*, 13, 97-123.
- [20] Carino, N. J., & Lew, H. S. (1982). "Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete", In *Journal Proceedings*, 79(3), 214-219.
- [21] Raphael, J.M. (1984). "Tensile strength of concrete", *ACI J*, 81(2), 65-158.
- [22] Ahmad, S. H., & Shah, S. P. (1985). "Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete", *PCI Journal*, 30(6), 92-119.
- [23] <http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html>
- [24] Minitab 15 Statistical Software [Computer software]. Incorporation, Minitab
- [25] Yasar, E., Atis, C. D., Kilic, A., & Gulsen, H. (2003). "Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash", *Materials Letters*, 57(15), 2267-2270.
- [26] Lo, T. Y., Cui, H. Z., & Li, Z. G. (2004). "Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete", *Waste Management*, 24(4), 333-338.
- [27] Ozyildirim, H. C. (2011). Laboratory investigation of lightweight concrete properties (No. FHWA/VCTIR 11-R17).
- [28] Tassew, S. T., & Lubell, A. S. (2012). "Mechanical properties of lightweight ceramic concrete", *Materials and structures*, 45(4), 561-574.
- [29] Lee, H. S., Ismail, M. A., Woo, Y. J., Min, T. B., & Choi, H. K. (2014). "Fundamental study on the development of structural lightweight concrete by using normal coarse aggregate and foaming agent", *materials*, 7(6), 4536-4554.
- [30] Hamad, A. J. (2014). "Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete", *International Journal of Materials Science and Engineering*, 2(2), 152-157.
- [31] Tasdemir, C., Sengul, O., & Tasdemir, M. A. (2017). "A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes", *Energy and Buildings*, 151, 469-475.
- [32] CSA CAN3-A23.3. (2004). Design of concrete standards for buildings (pp. 53-61). 5-15, (2003).
- [33] Jobse, H. J., & Moustafa, S. E. (1984). "Applications of high strength concrete for highway bridges", *PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. JOURNAL*, 29(3).
- [34] Cook JE. 10,000 psi concrete. *Concr Int* (1989). 11(10), 67-75.

## طرح اختلاط مطالعات گذشته

جدول ۱ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۷ و ۲۸ روزه

| مؤلف                    | نسبت آب به سیمان | لیکا      |          | آرجکس     |          | آرلیتا    |          |
|-------------------------|------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                         |                  | درشت دانه | ریز دانه | درشت دانه | ریز دانه | درشت دانه | ریز دانه |
| Bogas and Nogueira [۲۱] | ۰/۳۵             | ۱/۳۰      | ۰/۵۶     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۴۵             | ۱/۸۷      | ۰/۸۰     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۴۰             | ۱/۵۸      | ۰/۶۸     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | ۱/۳۲      | ۰/۵۶     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۳۰             | ۱/۰۴      | ۰/۴۵     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | ۱/۵۲      | ۰/۶۵     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | ۱/۱۱      | ۰/۴۸     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | ۱/۰۱      | ۰/۴۳     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | ۰/۴۷      | ۰/۶۲     | -         | -        | -         | -        |
|                         | ۰/۴۵             | -         | -        | ۱/۸۴      | ۰/۷۹     | -         | -        |
|                         | ۰/۴۰             | -         | -        | ۱/۵۶      | ۰/۶۷     | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | -         | -        | ۱/۳۰      | ۰/۵۶     | -         | -        |
|                         | ۰/۳۰             | -         | -        | ۱/۰۳      | ۰/۴۴     | -         | -        |
|                         | ۰/۳۵             | -         | -        | ۱/۱۴      | ۰/۴۹     | -         | -        |
| ۰/۳۵                    | -                | -         | -        | -         | ۱/۳۲     | ۰/۵۶      |          |

جدول ۲ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۲۸ روزه

| مؤلف                           | نسبت آب به سیمان | خاکستر بادی | ریز دانه طبیعی | سنگدانه سبک بازیافتی | فوق روان کننده (٪) |
|--------------------------------|------------------|-------------|----------------|----------------------|--------------------|
| Prinya Chindapasirt et al.[۲۲] | ۰/۲۶             | -           | ۰/۱            | ۱/۶۰                 | ۱/۴                |
|                                | ۰/۲۹             | -           | ۰/۲            | ۱/۶۰                 | ۱/۷                |
|                                | ۰/۳۱             | -           | ۰/۳            | ۱/۶۰                 | ۲/۰                |
|                                | ۰/۲۶             | ۰/۱         | -              | ۱/۶۰                 | ۱/۴                |
|                                | ۰/۲۹             | ۰/۲         | -              | ۱/۶۰                 | ۱/۷                |
|                                | ۰/۳۱             | ۰/۳         | -              | ۱/۶۰                 | ۲/۰                |

جدول ۳ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۳، ۷ و ۲۸ روزه

| مؤلف                 | نسبت آب به سیمان | میکرو سیلیس | خاکستر بادی | ریز دانه طبیعی | درشت دانه شل | افزودنی (%) |
|----------------------|------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|-------------|
| Jerlin.J et al. [۲۳] | ۰/۴              | -           | -           | ۱/۵۸           | ۰/۶۰         | ۰/۷         |
|                      | ۰/۴              | ۰/۰۵        | -           | ۱/۶۵           | ۰/۶۳         | ۰/۷         |
|                      | ۰/۴۴             | ۰/۱۰        | -           | ۱/۷۵           | ۰/۶۶         | ۰/۸         |
|                      | ۰/۴۶             | ۰/۱۷        | -           | ۱/۸۶           | ۰/۷۰         | ۰/۸         |
|                      | ۰/۴              | -           | ۰/۰۵        | ۱/۶۵           | ۰/۶۳         | ۰/۷         |
|                      | ۰/۴۴             | -           | ۰/۱۰        | ۱/۷۵           | ۰/۶۶         | ۰/۸         |
|                      | ۰/۴۶             | -           | ۰/۱۷        | ۱/۸۶           | ۰/۷۰         | ۰/۸         |
|                      | ۰/۳۸             | -           | -           | ۱/۵۸           | ۰/۶۰         | ۰/۹         |
|                      | ۰/۴۲             | ۰/۱۱        | -           | ۱/۷۵           | ۰/۶۶         | ۱/۰         |
|                      | ۰/۴۲             | -           | ۰/۱۱        | ۱/۷۵           | ۰/۶۶         | ۱/۰         |

جدول ۴ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۲۸ روزه

| مؤلف                                 | نسبت آب به سیمان | خاکستر بادی | ریز دانه و درشت دانه پومیس | فوق روان کننده (%) |
|--------------------------------------|------------------|-------------|----------------------------|--------------------|
| Harun Tanyildizi & Ahmet Coskun [۲۴] | ۰/۷۷             | -           | ۱/۶۴                       | ۱/۲                |
|                                      | ۰/۷۷             | ۰/۱۰        | ۱/۸۰                       | ۱/۳                |
|                                      | ۰/۷۷             | ۰/۲۵        | ۱/۹۸                       | ۱/۵                |
|                                      | ۰/۷۷             | ۰/۴۰        | ۲/۲۲                       | ۱/۷                |

جدول ۵ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه

| مؤلف                   | نسبت آب به سیمان | خاکستر بادی | ریز دانه اسکوریا | درشت دانه اسکوریا |
|------------------------|------------------|-------------|------------------|-------------------|
| Ergul Yasar et al [۲۵] | ۰/۵۵             | -           | ۱/۴۰             | ۱/۱۰              |
|                        | ۰/۶۹             | ۰/۲۵        | ۱/۷۵             | ۱/۳۸              |

جدول ۶ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۳، ۷ و ۲۸ روزه

| مولف                           | آب   | میکروسیلیس | پودر سنگ | ریزدانه طبیعی | ریزدانه لیکا | فوق روان کننده(%) |
|--------------------------------|------|------------|----------|---------------|--------------|-------------------|
| حسینعلی بیگی<br>و همکاران [۳۲] | ۰/۴۴ | ۰/۱۱       | -        | ۱/۴۷          | ۰/۷۹         | ۲/۰               |
|                                | ۰/۴۴ | ۰/۱۱       | -        | ۱/۴۷          | ۰/۷۹         | ۲/۰               |
|                                | ۰/۴۴ | ۰/۱۱       | -        | ۱/۴۷          | ۰/۷۹         | ۲/۰               |
|                                | ۰/۳۶ | ۰/۱۱       | -        | ۱/۲۹          | ۰/۵۵         | ۲/۲۲              |
|                                | ۰/۳۶ | ۰/۱۱       | ۰/۴۴     | ۰/۹۸          | ۰/۴۲         | ۲/۲۲              |
|                                | ۰/۳۶ | ۰/۱۱       | ۰/۳۳     | ۰/۸۰          | ۰/۴۳         | ۱/۶۷              |
|                                | ۰/۳۱ | ۰/۱۱       | ۰/۳۳     | ۱/۱۲          | ۰/۴۷         | ۱/۳۳              |
|                                | ۰/۳۹ | ۰/۱۱       | ۰/۳۳     | ۰/۹۶          | ۰/۶۳         | ۱/۳۳              |

جدول ۷ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

| مولف                 | آب   | سنگدانه ریز رسی | سنگدانه درشت رسی | افزودنی کاهنده آب<br>(لیتر بر متر مکعب) |
|----------------------|------|-----------------|------------------|---|
| T.Y.LO et al<br>[۲۶] | ۰/۵۵ | ۱/۶۹            | ۱/۳۳             | ۲/۶                                     |
|                      | ۰/۵۵ | ۱/۶۹            | ۱/۳۳             | ۲/۶                                     |
|                      | ۰/۵۵ | ۱/۶۹            | ۱/۳۳             | ۲/۶                                     |
|                      | ۰/۵۴ | ۱/۵۸            | ۱/۲۴             | ۲/۶                                     |
|                      | ۰/۵۴ | ۱/۵۸            | ۱/۲۴             | ۲/۶                                     |
|                      | ۰/۵۴ | ۱/۵۸            | ۱/۲۴             | ۲/۶                                     |
|                      | ۰/۵۶ | ۱/۲۶            | ۱/۰۸             | -                                       |
|                      | ۰/۵۶ | ۱/۲۶            | ۱/۰۸             | -                                       |
|                      | ۰/۵۶ | ۱/۲۶            | ۱/۰۸             | -                                       |

جدول ۸ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۲۸ روزه

| فوق روان<br>کننده(%) | ریزدانه |       |         | درشت دانه |         | میکروسیلیس | آب   | مولف                                       |
|----------------------|---------|-------|---------|-----------|---------|------------|------|--|
|                      | طبیعی   | پومیس | اسکوریا | پومیس     | اسکوریا |            |      |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۶۲    | -     | -       | -         | ۱/۵۹    | ۰/۱۱       | ۰/۳  | علیرضا انتظاری<br>و جمشید<br>اسماعیلی [۳۴] |
| ۱,۶۷                 | ۱/۶۲    | -     | -       | -         | ۱/۵۹    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱,۶۷                 | ۱/۶۲    | -     | -       | -         | ۱/۵۹    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱,۶۷                 | ۱/۶۲    | -     | -       | -         | ۱/۵۹    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۴۳                 | ۱/۳۹    | -     | -       | -         | ۱/۳۶    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۴۳                 | ۱/۳۹    | -     | -       | -         | ۱/۳۶    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۴۳                 | ۱/۳۹    | -     | -       | -         | ۱/۳۶    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۴۳    | -     | -       | -         | ۱/۵۴    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۴۳    | -     | -       | -         | ۱/۵۴    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۴۳    | -     | -       | -         | ۱/۵۴    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۴۳    | -     | -       | -         | ۱/۵۴    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۴۳    | -     | -       | -         | ۱/۵۴    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۴۳    | -     | -       | -         | ۱/۵۴    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۳۲    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۳۲    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۳۲    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۳۲    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۳۲    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۳۲    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۰۴    | -     | ۰/۴۱    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۰۴    | -     | ۰/۴۱    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۰/۴۵    | -     | ۰/۹۳    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۰/۴۵    | -     | ۰/۹۳    | -         | ۱/۵۰    | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۳۴    | -     | -       | ۱/۲۸      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳۵ |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۳۴    | -     | -       | ۱/۲۸      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۲۴    | -     | -       | ۱/۳۵      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۲۴    | -     | -       | ۱/۳۵      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۱/۱۳    | -     | -       | ۱/۴۲      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۲۰    | ۱/۲۸      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | -       | -     | ۱/۲۰    | ۱/۲۸      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۰/۶۸    | -     | ۰/۶۰    | ۱/۲۸      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |
| ۱/۶۷                 | ۰/۶۸    | -     | ۰/۶۰    | ۱/۲۸      | -       | ۰/۱۱       | ۰/۳  |  |

جدول ۹ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۲۸ و ۹۰ روزه

| درشت دانه سبک |       |      | سنگدانه ریز طبیعی | آب   | مولف                     |
|---------------|-------|------|-------------------|------|--------------------------|
| رسی           | اسلیت | شیل  |                   |      |                          |
| -             | -     | ۲/۹۵ | ۲/۷۵              | ۰/۴۳ | H. Celik Ozyildirim [۲۷] |
| -             | -     | ۱/۲۸ | ۲/۴۲              | ۰/۴۳ |                          |
| -             | ۲/۰۹  | -    | ۳/۶۰              | ۰/۴۳ |                          |
| -             | ۱/۶۸  | -    | ۲/۸۸              | ۰/۳۵ |                          |
| -             | -     | ۲/۱۹ | ۳/۵۰              | ۰/۴۳ |                          |
| -             | -     | ۱/۷۵ | ۲/۸۰              | ۰/۳۵ |                          |
| ۳/۰۵          | -     | -    | ۲/۶۴              | ۰/۴۳ |                          |
| ۱/۳۸          | -     | -    | ۴/۳۲              | ۰/۴۳ |                          |
| -             | ۲/۰۲  | -    | ۳/۳۹              | ۰/۳۹ |                          |
| ۱/۳۵          | -     | -    | ۴/۰۶              | ۰/۳۹ |                          |
| -             | -     | ۱/۲۵ | ۴/۱۵              | ۰/۳۹ |                          |
| -             | -     | ۲/۱۱ | ۳/۲۹              | ۰/۳۹ |                          |
| ۲/۹۲          | -     | -    | ۲/۴۸              | ۰/۳۹ |                          |
| -             | -     | ۲/۸۲ | ۲/۵۸              | ۰/۳۹ |                          |

جدول ۱۰ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۳، ۷ و ۲۸ روزه

| درشت دانه لیکا | سنگدانه ریز لیکا | آب   | مولف                                   |
|----------------|------------------|------|--|
| ۰/۴۰           | ۰/۱۴             | ۰/۲۰ | Samson T. Tassew & Adam S. Lubell [۲۸] |
| ۰/۴۰           | ۰/۱۴             | ۰/۲۲ |  |
| ۰/۴۰           | ۰/۱۴             | ۰/۲۴ |  |
| ۰/۳۰           | ۰/۱۴             | ۰/۲۴ |  |
| ۰/۵۰           | ۰/۱۴             | ۰/۲۴ |  |

جدول ۱۱ پ: طرح اختلاط (به نسبت وزن سیمان) نمونه ۲۸ روزه

| مولف                            | آب   | ریز دانه طبیعی | سنگدانه پومیس<br>(۲-۴)mm | درشت دانه<br>طبیعی | فوق روان کننده (%) |
|---------------------------------|------|----------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Canan Tasdemir<br>et al<br>[۳۱] | ۰/۴۳ | ۱/۶۲           | ۰/۵۸                     | ۱/۹۵               | ۱/۵                |
|                                 | ۰/۴۳ | ۱/۶۲           | ۰/۸۷                     | ۰/۹۷               | ۱/۵                |
|                                 | ۰/۴۳ | ۱/۶۲           | ۱/۱۵                     | -                  | ۱/۵                |
|                                 | ۰/۴۳ | ۱/۶۱           | ۱/۱۵                     | -                  | ۱/۵                |
|                                 | ۰/۴۳ | ۱/۶۲           | ۱/۱۵                     | -                  | ۱/۵                |
|                                 | ۰/۴۳ | ۰/۸۱           | ۱/۴۰                     | -                  | ۱/۵                |
|                                 | ۰/۴۳ | -              | ۱/۶۵                     | -                  | ۱/۵                |

**M. Saadatkhosh**

M.Sc. Student, Department of  
Civil Engineering, Shahab Danesh  
University.

**e-mail:** Masoudsaadakhosh@gmail.com

**M. Arezoumandi\***

Assistant Professor, Department of  
Civil Engineering, Shahab Danesh  
University.

**e-mail:**  
arezoumandi@shahabdanesh.ac.ir

**S.H. PourHosseini**

M.Sc. Student, Department of  
Civil Engineering, Shahab Danesh  
University.

**e-mail:**  
hadipurhoseini967@gmail.com

**Verification of Mechanical Properties Provisions  
of Existing Codes for Lightweight Concretes**

*The demand for structural lightweight concrete (LWC) in many applications of modern construction is increasing. The use of lightweight aggregate concrete is beneficial in terms of reducing structural dead load, improving sound and thermal insulations, and ease of handling and transportation. A comprehensive literature review on mechanical properties of lightweight concrete including compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and flexural strength is presented. In addition, databases are created for mechanical properties of lightweight concrete in order to lead to changes or acceptance in design codes and standards' provisions. These data were compared with the American, European, Australian, Japanese and Canadian standards provisions. Results of this study show that existing code provisions are not always conservative for mechanical properties of lightweight concrete. Furthermore, statistical analysis (nonlinear regression) has been performed on mechanical properties of lightweight concrete and new relationships have been suggested for mechanical properties of lightweight concrete.*

**Keywords:** Lightweight Concrete, Conventional Concrete, Tensile splitting strength, Modulus of elasticity, Flexural strength.

---

\* Corresponding author