

## راستی‌آزمایی روابط مشخصات مکانیکی آیین‌نامه‌های معتبر موجود برای بتن پُر مقاومت

سیدمرتضی موسوی بفرویی<sup>۱\*</sup>، مهدی آرزومندی<sup>۲</sup>، مسعود سعادت‌خوش<sup>۳</sup> و ابوالفضل آرزومند<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته، کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش

<sup>۲</sup> استادیار، گروه آموزشی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته، کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش

<sup>۴</sup> استادیار، گروه آموزشی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

Arezoumandi@shahabdanesh.ac.ir

**چکیده:** در چند دهه اخیر رسیدن به مقاومت فشاری بالا در بتن از اهداف اصلی دست‌اندرکاران کارهای بتنی بوده است. بتن پر مقاومت با توجه به نیاز فزاینده‌ای که به استفاده از ساختمان‌های بلند وجود دارد، استفاده از آن در حال توسعه است. از جمله مزایای این بتن‌ها می‌توان به مقاومت فشاری و مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته بیشتر، نفوذ پذیری کمتر، دوام بیشتر به دلیل تخلخل کمتر و مقاومت پیوستگی بیشتر بین میلگرد و بتن اشاره کرد. در این نوشتار تلاش ما بر این است تا با مقایسه نتایج تحقیقات گذشته، مشخصات مکانیکی بتن پر مقاومت (مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته) را با روابط بتن معمولی آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، کانادا، استرالیا، ژاپن و همچنین روابط محققین گذشته مقایسه کرده و بر اساس تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) رابطه‌ای مناسب پیشنهاد گردد. بررسی نتایج گذشته نشان می‌دهد که نرخ افزایش مقاومت کششی بتن پر مقاومت مشابه بتن معمولی اما در مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته کمتر از بتن معمولی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** بتن پر مقاومت، بتن معمولی، مشخصات مکانیکی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته

## Verification of Mechanical Properties Provisions of Existing Codes for High-Strength Concrete

S.M. Mousavi.B, M. Arezoumandi, M.Saadatkhoosh and A. Arezoomand

**Abstract:** Concrete is one of the most used building materials. In recent decades, achieving high compressive strength in concrete has been the main objective of concrete workers. One of the produced concrete is high-strength concrete which its application is being developed due to the increasing demand for faster utilization of under construction buildings and facilities. High-strength concrete was used in Chicago for the first time. High compressive strength, high tensile strength, greater modulus of elasticity, lower permeability, longer durability all are factors reducing porosity and increasing high bonding strength between bars and reinforced concrete, representing the advantages of these concrete products. In this paper, our attempt is to investigate the mechanical properties of high-strength concrete with the equations of conventional concrete of the five United States of America, Europe, Canada, Australia and Japan Codes and suggest a suitable relationship by comparing the results of previous investigations. Experimental results indicate that in high-strength concrete, the rate of increase in tensile strength is similar to those of normal concrete but it is lower in modulus of rupture and modulus of elasticity when compared with normal concrete.

**Keywords:** High-Strength Concrete, Conventional Concrete, Mechanical Properties, Compressive Strength, Modulus of Elasticity.

**1- مقدمه**

بر اساس تعریف موسسه بتن آمریکا، بتن پر مقاومت بتنی است که دارای مقاومت فشاری بالاتر از 40 مگا پاسکال باشد [3]. اما طبق بند 9-9-1-2 آیین نامه ایران، بتن با مقاومت فشاری بالاتر از 50 مگاپاسکال را بتن پرمقاومت می نامند [4].

از بتن پر مقاومت اصولاً در ساخت ستون های ساختمان های مرتفع، سازه های ساحلی، روسازی راه ها، سازه های بتنی با هدف خاص و پل های بتنی پیش تنیده استفاده می شود. استفاده از این نوع بتن در ستون های ساختمان های مرتفع باعث کاهش ابعاد ستون و افزایش طبقات می شود. همچنین در ساخت سازه هایی مانند پایه های پل، سقف جایگاه تماشاگران در میدان های ورزشی و خود میدان های ورزشی از بتن پر مقاومت استفاده می شود [5].

**2- روش پژوهش**

در این نوشتار ابتدا تمامی داده های مقالات پیشین اعم از مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بتن پرمقاومت را استخراج نموده و تلاش بر این است تا با مقایسه تعداد بسیاری از آزمایش های انجام شده توسط محققین گذشته، مشخصات مکانیکی بتن پر مقاومت را با آیین نامه های معتبر حاضر (آمریکا، اروپا، کانادا، استرالیا و ژاپن) و همچنین روابط بدست آمده توسط محققین گذشته، در رابطه با بتن معمولی بررسی و رابطه ای مناسب پیشنهاد گردد.

**3- مشخصات مکانیکی**

در این بخش نتایج آزمایش های مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته بتن پر مقاومت را با آیین نامه های معتبر دنیا و روابط پیشنهادی محققین گذشته مقایسه شده است.

**3-1- مقاومت کششی**

برای ارزیابی مقاومت کششی بتن پرمقاومت و بتن معمولی به طور کلی از سه روش شناخته شده شامل: (1) آزمایش کشش مستقیم (2) آزمایش کشش دو نیم شدن (3) آزمایش کشش حاصل از خمش (سه نقطه ای

بتن جسم مرکبی است که از اجزای مختلف شامل سنگدانه، سیمان و آب ساخته می شود. شاید کمتر ماده ساختمانی می توان یافت که تا این حد تنوع داشته باشد؛ زیرا نه تنها با تغییر دادن مقدار سیمان، آب و سنگدانه ها، بلکه با مصرف سیمان های مختلف و مصالح سنگی متفاوت می توان بتن هایی با خواص متفاوت، متناسب با نوع نیاز تولید کرد. امروزه بتن به عنوان یک ماده ساختمانی مهم در ساخت انواع مختلف سازه ها نظیر ساختمان ها، پل ها، تونل ها، سدها، اسکله ها، راه ها و سایر سازه های خاص دیگر کاربرد دارد. در ساخت و سازه های معمولی، غالباً تنها معیار پذیرش بتن، مقاومت فشاری آن است. شاید این مسئله از آنجا ناشی می شود که بتنی با مقاومت فشاری رضایت بخش، غالباً دیگر ویژگی ها را در حد متوسط خواهد داشت. در چند دهه اخیر رسیدن به مقاومت فشاری بالا در بتن از اهداف اصلی دست اندرکاران کارهای بتنی بوده است. بتن پرمقاومت (High-strength concrete) با توجه به نیاز فزاینده ای که به استفاده سریع تر از ساختمان ها و تاسیسات در حال ساخت وجود دارد، استفاده از آن در حال توسعه است.

برای اولین بار بتن پرمقاومت (HSC) در سال 1965 میلادی (1344 شمسی) در شیکاگو استفاده گردید [1]. از جمله مزایای این بتن ها می توان به مقاومت فشاری بالا، مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته بیشتر، نفوذ پذیری کمتر، دوام بیشتر به دلیل تخلخل کمتر و مقاومت پیوستگی بیشتر میلگرد و بتن اشاره کرد.

از عوامل موثر در رسیدن به چنین مقاومت های بالا در بتن، استفاده از شن و ماسه مقاوم و با شکل مناسب، افزایش مقدار سیمان مصرفی، محدود کردن اندازه بزرگترین سنگدانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت ماسه به سیمان مناسب برای همگنی بیشتر آن می باشد. همچنین با استفاده از مواد بسیار ریزدانه و با اندازه هایی کمتر از دهم میکرون مانند دوده سیلیس می توان مجموعه ای مترکم تر و با تخلخل بسیار کم را تهیه نمود [2].

کوره آهن‌گدازی مقاومت کششی افزایش یافته است [15].  
دوگ و همکارش با مطالعه بر روی بتن پرمقاومت با پوزولان‌های میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره تا 40 درصد افزایش مقاومت کششی را گزارش کرده اند [16].  
شانگ افزایش 23 درصدی مقاومت کششی بتن پر مقاومت با میکروسیلیس در مقایسه با بتن معمولی را تایید کرده است [17].  
عاشور تا 50 درصد افزایش مقاومت کششی بتن پر مقاومت با پوزولان میکروسیلیس را نسبت به بتن معمولی، نتیجه گرفته است [18].  
کلاسون و همکارش بتن پر مقاومت با افزودنی میکروسیلیس را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش 11 درصدی مقاومت کششی بتن پرمقاومت نسبت به بتن معمولی بود [19].  
هاک و همکارش با استفاده از خاکستر بادی در بتن پر مقاومت، 30 درصد افزایش مقاومت کششی را نسبت به بتن معمولی نشان داده اند [20].  
جیان یانگ و همکارش با انجام آزمایش بر روی نمونه های بتن پرمقاومت حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس تا 27 درصد افزایش مقاومت کششی را گزارش داده اند [21].  
اوزتوران و همکارش افزایش 33 درصدی مقاومت کشش بتن پرمقاومت با میکروسیلیس را نشان داده است [22].  
ژو و همکارانش با ساخت بتن پرمقاومت حاوی میکروسیلیس نشان داده‌اند که مقاومت کششی بتن پر مقاومت تنها 5 درصد مقاومت فشاری آن است [23].  
بانک داده‌ای از مقاومت کششی بتن با مقاومت بالا مورد استفاده قرار گرفته‌است که در شکل 1 قابل مشاهده می‌باشد [24].

### 3-1-1- مقایسه با آیین نامه های معتبر

در این بخش نتایج مقاومت کششی مطالعات گذشته [7-24] که در بخش قبل خلاصه آنها شرح داده شد با روابط آیین نامه‌های آمریکا (معادله 1)، اروپا (معادله 2)، استرالیا (معادله 3)، ژاپن (معادله 4)، اشتو و ACI 363

یا چهار نقطه‌ای) استفاده می‌شود. با توجه به سختی انجام آزمایش کشش مستقیم، نتایج این آزمون‌ها کمیاب هستند و بیشتر تحقیقات مقاومت کششی را از نتایج آزمایش‌های ناشی از آزمون کشش ناشی از خمشی یا آزمایش کشش دو نیم شدن بدست آورده‌اند. بر طبق استاندارد ASTM C496-1 [6]، روش آزمایش دو نیم شدن با اعمال نیروی فشاری قطری روی آزمون استوانه‌ای بتن که به صورت افقی بین دو صفحه فولادی قرار گرفته، مقاومت کششی به روش دو نیم شدن تعیین می‌گردد.

باشیما و همکارانش با مطالعه بر روی بتن پرمقاومت حاوی میکروسیلیس افزایش 20 تا 36 درصدی مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی را گزارش کرده‌اند [5].  
خانزادی و همکارش افزایش مقاومت کششی 15 تا 17 درصدی بتن پرمقاومت حاوی میکروسیلیس و سرباره مس را تایید کرده است [7].

الجبری و همکارانش از سرباره مس و میکروسیلیس در بتن پرمقاومت استفاده کردند. نتایج افزایش 19 درصدی مقاومت کششی را نشان می‌دهد [8].

کیم و همکارانش بتن پرمقاومت حاوی متاکائولین و میکروسیلیس را مورد آزمایش قرار داد و افزایش 120 درصدی مقاومت کششی را تایید کرده است [9].

ایگراشی و همکارانش با مطالعه بر روی بتن حاوی میکروسیلیس افزایش 18 درصدی مقاومت کششی بتن پرمقاومت را گزارش داده است [10].

ویوو و همکارانش تا 33 درصد کاهش مقاومت کششی بتن پرمقاومت حاوی سرباره مسی و میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی را نتیجه گرفته اند [11].

ژانگ و همکارانش در تحقیق خود نشان داده‌اند که با افزایش مقاومت فشاری بتن پر مقاومت مقاومت کششی تا ده درصد کاهش یافته است [12].

ساتا و همکارانش با بررسی مقاومت کششی بتن پر مقاومت با پوزولان‌های خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و خاکستر حاصل از سوختن روغن پالم افزایش 13 درصدی آن نسبت به بتن معمولی را گزارش داده‌اند [13].  
یان و همکاران در تحقیق خود نشان داده‌اند که با افزایش مقاومت فشاری بتن پر مقاومت حاوی سرباره

(معادله 5) و CEB-FIP (معادله 6) در جدول 1 مقایسه می‌شود.

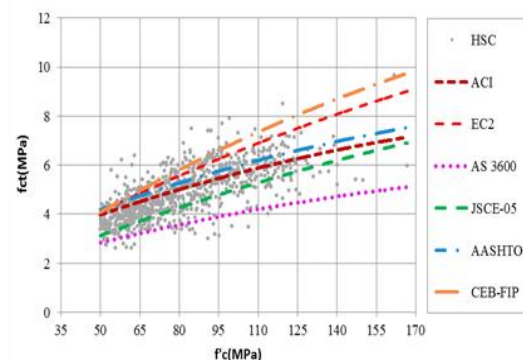
جدول 1. روابط آیین نامه های موجود برای مقاومت کششی

Table 1. The existing regulations for tensile strength

Formula	Regulations	Row
$f_{ct} = 0.56 (f_c)^{0.5}$	ACI 318[25]	(1)
$f_{ct} = 0.3 (f_c)^{2/3}$	EC 2[26]	(2)
$f_{ct} = 0.4 (f_c)^{0.5}$	AS 3600[27]	(3)
$f_{ct} = 0.23 (f_c)^{2/3}$	JSCE[28]	(4)
$f_{ct} = 0.59 (f_c)^{0.5}$	, AASHTO[29] ACI363[3]	(5)
$f_{ct} = 1.56 ((f_c - 8)/10)^{2/3}$	CEB-FIP[30]	(6)

با مطالعه بر روی دهها مقاله و بررسی 1232 داده موجود در مقالات، میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین نامه‌ای برای آیین نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن، اشتو و ACI 363 و CEB-FIP به ترتیب برابر با 0.97، 0.88، 1.36، 1.14، 0.92 و 1.84 می‌باشد.

همچنین روابط آیین نامه‌های آمریکا و اروپا به ترتیب برای 56 و 84 درصد داده‌ها، برای روابط آیین نامه‌های استرالیا و ژاپن به ترتیب برای 3 و 17 درصد داده‌ها و برای آیین نامه AASHTO، CEB-FIP و ACI 363 به ترتیب برای 73، 89 و 73 درصد داده‌ها غیرمحافظة کارانه است. شکل 1، نتایج آزمایشگاهی را با روابط آیین نامه های فوق مقایسه می‌کند.



شکل 1. مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن پر مقاومت با روابط آیین نامه‌ها

Fig. 1. Comparison of the results of tensile strength of high-strength concrete with the regulations of the regulations

### 3-1-2- مقایسه با روابط محققین گذشته

در این بخش نتایج با روابط محققین گذشته آکازاوا (معادله 7)، کارنیرو و بارسلو (معادله 8)، کارینو و لو (معادله 9)، رافائل (معادله 10) و احمد و شاه (معادله 11) که در جدول 2 ذکر گردیده‌است نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

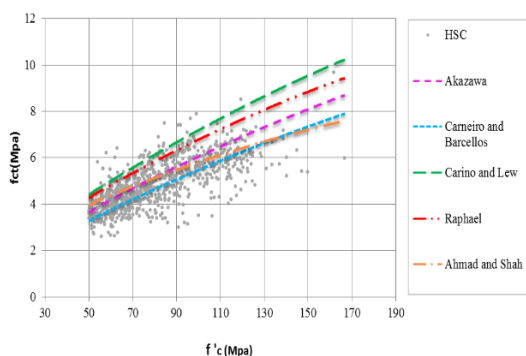
جدول 2. روابط محققین گذشته برای مقاومت کششی

Table 2. Past research relationships for tensile strength

Formula	Regulations	Row
$f_{ct} = 0.209 (f_c)^{0.73}$	Akazawa [31]	(7)
$f_{ct} = 0.185 (f_c)^{0.735}$	Carneiro [32] and Barcellos	(8)
$f_{ct} = 0.272 (f_c)^{0.71}$	Carino and Lew [33]	(9)
$f_{ct} = 0.313 (f_c)^{0.667}$	Raphael [34]	(10)
$f_{ct} = 0.46 (f_c)^{0.55}$	Ahmad and Shah [35]	(11)

میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط محققین گذشته برای روابط مقاومت کششی محققین گذشته شامل آکازاوا، کارنیرو و بارسلو، کارینو و لو، رافائل و احمد و شاه به ترتیب برابر با 0.95، 0.84، 0.80، 1.05، 0.95 و 0.84 می‌باشد.

همچنین برای روابط آکازاوا، کارنیرو و بارسلو، کارینو و لو، رافائل و احمد و شاه به ترتیب برای 63، 34، 95، 91 و 65 درصد داده‌ها غیر محافظه کارانه می‌باشد (شکل 2).



شکل 2. مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن پر مقاومت با روابط محققین گذشته

Fig. 2. Comparison of the results of tensile strength of high-strength concrete with previous investigators' relations

باشیما و همکارانش، افزایش 16 درصدی مدول گسیختگی بتن پرمقاومت حاوی میکروسیلیس را گزارش داده است [5].

کیم و همکارانش که بتن پرمقاومت شامل متاکئولین و سرباره مس را مورد بررسی قرار داده است، افزایش 100 درصدی مدول گسیختگی را تایید کرده است [9].

ویوو و همکارانش تا 40 درصد کاهش مدول گسیختگی بتن پرمقاومت حاوی سرباره مسی و میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی را نتیجه گرفته اند [11].

جیان یانگ و همکارش با انجام آزمایش بر روی نمونه های بتن پرمقاومت حاوی سرباره کوره آهن گدازی و میکروسیلیس تا 27 درصد افزایش مدول گسیختگی را گزارش داده اند [21].

اوزتوران و همکارش افزایش 30 درصدی مدول گسیختگی بتن پرمقاومت با میکروسیلیس را نشان داده است [22]. داروین و همکارانش نتیجه بررسی مدول گسیختگی بتن پرمقاومت حاوی خاکستر بادی و میکروسیلیس را افزایش 57 درصدی نسبت به بتن معمولی گزارش داده است [38].

### 3-2-1- مقایسه با آیین نامه های معتبر

در این بخش نتایج آزمایش های خمشی مطالعات گذشته با روابط آیین نامه های آمریکا (معادله 12)، اروپا (معادله 13)، استرالیا (معادله 14)، AASHTO (معادله 15) و ACI 363 (معادله 16) همانطور که در جدول 3 مشاهده می گردد، مقایسه می شود.

جدول 3. روابط آیین نامه های معتبر برای مدول گسیختگی

Table 3. The existing regulations for rupture module

Formula	Regulations	Row
$f_r = 0.62 (f'_c)^{0.5}$	ACI318	(12)
$f_r = \text{Max}((1.6 - (h/200)) * f_{ct}, f_{ct})$	EC 2	(13)
$f_r = 0.6 (f'_c)^{0.5}$	AS3600	(14)
$f_r = 0.63 (f'_c)^{0.5}$	AASHTO	(15)
$f_r = 0.94 (f'_c)^{0.5}$	ACI 363	(16)

شکل 4، نتایج آزمایشگاهی را با روابط آیین نامه های آمریکا، اروپا، استرالیا، ایتالی و ACI 363 مقایسه می کند. با بررسی بر روی 578 داده مربوط به مدول گسیختگی بتن پرمقاومت [5، 8، 9، 18، 21، 22، 24، 38، 39، 40]

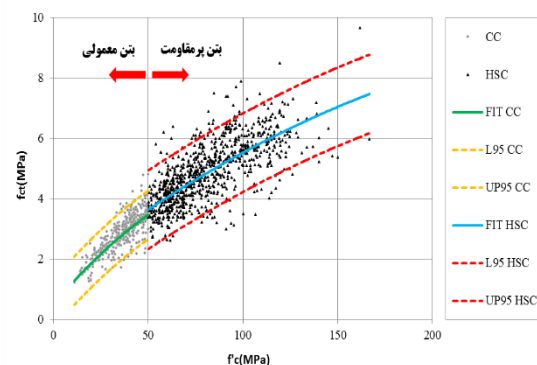
### 3-1-3- تحلیل و آنالیز رابطه پیشنهادی

همچنین با بررسی بر روی نتایج محدوده 95 درصد خط برازش (رگرسیون غیرخطی) و همچنین بهترین خط برازش شده (Best Fit) با نرم افزار Minitab 17.1.0 [36]، بر روی داده های بتن معمولی و بتن پرمقاومت (شکل 3) به این نتیجه می رسیم که در بهترین خط برازش شده، شیب بهترین خط برازش شده بتن معمولی تقریباً مشابه با شیب بهترین خط برازش شده بتن پرمقاومت می باشد و این بدان معناست که افزایش مقاومت کششی در بتن معمولی تقریباً مشابه بتن پرمقاومت می باشد.

همچنین بعد از بررسی داده ها و تحلیل های آماری با نرم افزار Minitab 17.1.0 رابطه پیشنهادی مقاومت کششی برای بتن پرمقاومت به شرح زیر پیشنهاد می شود.

$$f_{ct} = a (f'_c) b \quad (1)$$

$$f_{ct} = 0.33 (f'_c)^{0.60} \quad (2)$$



شکل 3. مقایسه تحلیل آماری محدوده 95 درصد خط

برازش (رگرسیون غیرخطی) بتن معمولی و بتن پرمقاومت

Fig. 3. Comparison of statistical analysis of 95% fit line (nonlinear regression) of control concrete and high-strength concrete

### 3-2-2- مدول گسیختگی

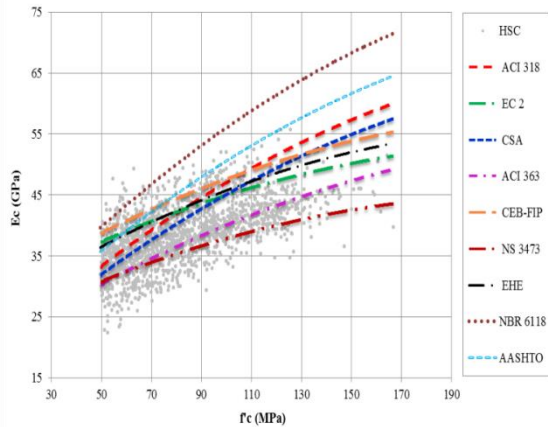
حداکثر تنش کششی تئوری ایجاد شده در لایه زیرین تیر با مقطع مربع (طبق آزمایش [37] ASTM C78-10) مدول گسیختگی نامیده می شود.

طبق مطالعات انجام شده توسط محققین گذشته [5، 9، 11، 21، 22، 38] افزایش مدول گسیختگی تا 30 درصد گزارش شده است.



راستی آزمایشی روابط مشخصات مکانیکی بتن پرمقاومت...

18، 81 و 98 درصد داده‌ها غیر محافظه کارانه می‌باشد. شکل 6، نتایج آزمایشگاهی را با روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، کانادا، ACI 363، اشتو، CEB، نروژ، اسپانیا و برزیل مقایسه می‌کند.



شکل 6. مقایسه نتایج مدول الاستیسیته بتن پر مقاومت با روابط آیین‌نامه‌های دنیا

Fig. 6. Comparison of the results of modulus of elasticity of high-strength concrete with previous investigators' relations

### 2-1-3- مقایسه با روابط محققین گذشته

همچنین در این بخش نیز نتایج با روابط بدست آمده توسط محققین گذشته موجود در جدول 5 نظیر احمد و شاه (معادله 26)، جابز و مصطفی (معادله 27) و دیناکار و همکاران (معادله 28) مقایسه می‌شود.

جدول 5. روابط محققین گذشته برای مدول الاستیسیته

Table 5. Past research relationships for modulus of elasticity

Formula	Regulations	Row
$E_c = 3.38 \times 10^{-5} \lambda^{25} (\sqrt{f'_c})^{0.65}$	Ahmad and Shah	(26)
$E_c = 0.103 \lambda^{1.5} (\sqrt{f'_c})^{0.5}$	Jobse and [49] Moustafa	(27)
$E_c = 4550 (\sqrt{f'_c})^{0.5}$	Dinakar et al [50]	(28)

میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط محققین گذشته برای روابط مدول الاستیسیته محققین گذشته

مظلوم و همکارانش نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس در بتن پر مقاومت باعث افزایش 10 درصدی مدول الاستیسیته نسبت به بتن معمولی می‌شود [42].

### 3-1-1- مقایسه با آیین نامه های معتبر

در این قسمت نتایج با روابط آیین‌نامه‌های آمریکا (معادله 17)، اروپا (معادله 18)، کانادا (معادله 19)، ACI 363 (معادله 20)، اشتو (معادله 21)، CEB-FIP (معادله 22)، نروژ (معادله 23)، اسپانیا (معادله 24) و برزیل (معادله 25) که در جدول 4 آورده شده‌است، مقایسه می‌گردد.

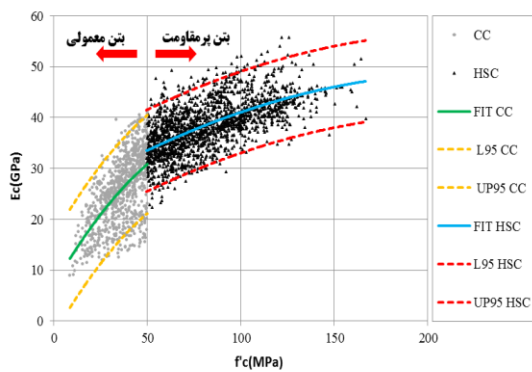
جدول 4. روابط آیین نامه های معتبر برای مدول

الاستیسیته

Table 4. The existing regulations for modulus of elasticity

Formula	Regulations	Row
$E_c = 4700 (f'_c)^{0.5}$	ACI 318	(17)
$E_c = 22 * (0.1 * (f'_c + 8))^{0.3}$	EC 2	(18)
$E_c = 4500 (f'_c)^{0.5}$	CSA [43]	(19)
$E_c = 3320 (f'_c)^{0.5} + 6890$	ACI 363	(20)
$E_c = 0.043 * K_1 * \lambda^{1.5} * (f'_c)^{0.5}$	AASHTO	(21)
$E_c = 10000 (f'_c + 8)^{1/3}$	CEB [44]	(22)
$E_c = 9500 (f'_c)^{0.3}$	NS 3473 [45]	(23)
$E_c = 10000 (f'_c)^{0.33}$	EHE [46]	(24)
$E_c = 5600 (f'_c)^{0.5}$	NBR [47] 6118	(25)

با مطالعه و بررسی 2646 داده موجود در مقالات [5، 12، 13، 14، 16، 17، 19، 20، 23، 24، 29، 39، 42، 43، 48] میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین‌نامه‌ای برای آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، کانادا، ACI 363، اشتو و CEB به ترتیب 0.92، 0.91، 0.96، 1.05، 0.85 و 0.86 و برای آیین‌نامه‌های نروژ، اسپانیا و برزیل 1.09، 0.90 و 0.77 می‌باشد. همچنین روابط آیین‌نامه‌های آمریکا و اروپا برای 75 و 81 درصد داده‌ها، کانادا و ACI 363 برای 65 و 33 درصد داده‌ها، اشتو و CEB-FIP برای 91 درصد داده‌ها، نروژ، اسپانیا و برزیل برای



شکل 8. مقایسه تحلیل آماری مدول الاستیسیته محدوده 95 درصد خط برازش (رگرسیون غیر خطی) بتن معمولی و بتن پر مقاومت

Fig. 8. Comparison of statistical analysis of 95% fit line (nonlinear regression) of control concrete and high-strength concrete

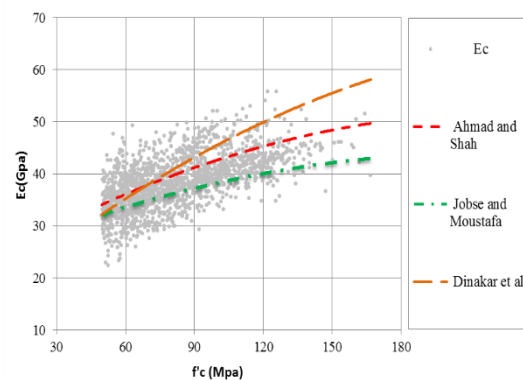
#### 4- نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده و مقایسه نتایج به دست آمده با آئین‌نامه‌های معتبر دنیا، همچنین بررسی نتایج تحقیقات مختلف انجام شده، نتایج زیر به دست آمد:

- با توجه به شکل 1 داده‌هایی که بالاتر از نمودار قرار بگیرند نشان‌دهنده محافظه کارانه بودن آن رابطه برای داده‌ها می‌باشد به این ترتیب روابط مقاومت کششی آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن، ایتو و ACI 36 و CEB-FIP به ترتیب برای 44، 16، 97، 83، 27 و 11 درصد داده‌های بتن پر مقاومت محافظه کارانه می‌باشد.
- در بهترین خط برازش شده برای داده‌های مقاومت کششی، شیب نمودار HSC تقریباً برابر با شیب نمودار بتن معمولی می‌باشد و این بدان معناست که نرخ افزایش مقاومت کششی بتن پر مقاومت تقریباً مشابه بتن معمولی می‌باشد.
- با توجه به شکل 4 روابط مدول گسیختگی آیین‌نامه‌های آمریکا، استرالیا و ایتو به طور میانگین برای 98 درصد داده‌ها محافظه کارانه می‌باشد.
- در بهترین خط برازش شده برای داده‌های مدول گسیختگی، شیب نمودار HSC کمتر از شیب نمودار بتن معمولی می‌باشد که به این ترتیب نرخ

احمد و شاه، جابز و مصطفی و دیناکار و همکاران به ترتیب 0.97، 1.06 و 0.95 بدست آمده‌است. شکل 7، نتایج آزمایشگاهی را با روابط محققین گذشته احمد و شاه، جابز و مصطفی و دیناکار و همکاران مقایسه می‌کند.

همچنین روابط محققین گذشته احمد و شاه، جابز و مصطفی و دیناکار و همکاران به ترتیب برای 64، 26 و 68 درصد داده‌ها غیر محافظه کارانه می‌باشد.



شکل 7. مقایسه نتایج مدول الاستیسیته بتن پر مقاومت با روابط محققین گذشته

Fig. 7. Comparison of the results of modulus of elasticity of high-strength concrete with previous investigators' relations

#### 3-3-3- تحلیل و آنالیز و رابطه پیشنهادی

با بررسی بر روی نتایج مدول الاستیسیته، محدوده 95 درصد خط برازش (رگرسیون غیر خطی) و همچنین بهترین خط برازش شده (Best Fit) بر روی داده‌های بتن معمولی و بتن پر مقاومت (شکل 8) به این نتیجه می‌رسیم که شیب بهترین خط برازش شده داده‌های بتن معمولی بیشتر از شیب بهترین خط برازش شده داده‌های بتن پر مقاومت می‌باشد، این بدان معناست که نرخ افزایش مدول الاستیسیته بتن معمولی نسبت به بتن پر مقاومت بیشتر می‌باشد.

علاوه بر آن بعد از تحلیل و بررسی داده‌های بتن پر مقاومت از نرم افزار Minitab 17.1.0 [36] رابطه پیشنهادی برای مدول الاستیسیته به شرح زیر می‌باشد.

$$E_c = a(f'_c)^b \quad (5)$$

$$E_c = 10.48(f'_c)^{0.29} \quad (6)$$



- and building materials, vol. 23, No. 6, p.p. 2132-2140, **2009**.
- [9] Kim, H. S.; Lee, S. H.; Moon, H. Y.; "Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin", Construction and building materials, vol. 21, No. 6, p.p. 1229-1237, **2007**.
- [10] Igarashi, S. I.; Bentur, A.; Kovler, K.; "Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes", Cement and Concrete Research, vol. 30, No. 11, p.p. 1701-1707, **2000**.
- [11] Wu, W.; Zhang, W.; Ma, G.; "Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete", Materials & Design, vol. 31, No. 6, p.p. 2878-2883, **2010**.
- [12] Zhang, X. X.; Ruiz, G.; Yu, R. C.; Tarifa, M.; "Fracture behavior of high-strength concrete at a wide range of loading rates", International Journal of Impact Engineering, vol. 36, No. 10-11, p.p. 1204-1209, **2009**.
- [13] Sata, V.; Jaturapitakkul, C.; Kiattikomol, K.; "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete", Construction and Building Materials, vol. 21, No. 7, p.p. 1589-1598, **2007**.
- [14] Donza, H.; Cabrera, O.; Irassar, E. F.; "High-strength concrete with different fine aggregate", Cement and Concrete Research, vol. 32, No. 11, p.p. 1755-1761, **2000**.
- [15] Yan, A.; Wu, K. R.; Zhang, D.; Yao, W.; "Effect of fracture path on the fracture energy of high-strength concrete", Cement and Concrete Research, vol. 31, No. 11, p.p. 1601-1606, **2001**.
- [16] Dong, Z.; Keru, W.; "Fracture properties of high-strength concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 13, No. 1, p.p. 86-88, **2001**.
- [17] Shannag, M. J.; "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", Cement and concrete composites, vol. 22, No. 6, p.p. 399-406, **2000**.
- [18] Ashour, S. A.; "Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of high-strength concrete beams", Engineering Structures, vol. 22, No. 5, p.p. 413-423, **2000**.
- [19] Claeson, C.; Gylltoft, K.; "Slender high-strength concrete columns subjected to eccentric loading", Journal of Structural Engineering, vol. 124, No. 3, p.p. 233-

افزایش مدول گسیختگی بتن معمولی نسبت به بتن پرمقاومت بیشتر است.

- با توجه به شکل 6 روابط مدول الاستیسیته آیین نامه‌های آمریکا، اروپا، کانادا، ACI 363، نروژ و اسپانیا به ترتیب برای 25، 19، 35، 67، 82 و 19 درصد داده‌ها محافظه کارانه می‌باشد.
- در بهترین خط برازش شده برای داده‌های مدول الاستیسیته، شیب نمودار HSC بیشتر از شیب نمودار بتن معمولی می‌باشد که نشان می‌دهد نرخ افزایش مدول الاستیسیته بتن معمولی نسبت به بتن پرمقاومت بیشتر می‌باشد.

#### مراجع

- [1] Monteiro P.; "Concrete: microstructure, properties, and materials", McGraw-Hill Publishing, **2006**.
- [2] Mokhtarzadeh, A.; French, C. E.; "Mechanical Properties of High Strength Concrete", Minnesota Department of Transportation Office of Research Administration Ford Building Mail Stop 330 University Avenue St. Paul, Minnesota 55117. **1998**.
- [3] ACI Committee 363.; "State-of-the-art report on high strength concrete", ACI J, vol. 81, No. 4, p.p. 364-411, **1984**.
- [4] Chapter 9 of the National Building Regulations.; Fourth Edition "Design and Implementation of Armored Concrete Buildings", National Bureau of Building Regulations, **1392**.
- [5] Bhikshma, V.; Nitturkar, K.; Venkatesham, Y.; "Investigations on mechanical properties of high strength silica fume concrete", Asian journal of civil engineering (building and housing), vol. 10, no. 3 p.p. 335-346, **2009**.
- [6] ASTM C 496/C 496M.; Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete. ASTM, West Conshohocken, **2011**.
- [7] Khanzadi, M.; Behnood, A.; "Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate", Construction and building materials, vol. 23, No. 6, p.p. 2183-2188, **2009**.
- [8] Al-Jabri, K. S.; Hisada, M.; Al-Saidy, A. H.; Al-Oraimi, S. K.; "Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate", Construction

- examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete*", In Journal Proceedings, Vol. 79, No. 3, p.p. 214-219, **1982**.
- [34] Raphael, J. M.; "Tensile strength of concrete", In Journal Proceedings, Vol. 81, No. 2, p.p. 158-165, **1984**.
- [35] Ahmad, S. H.; Shah, S. P.; "Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete", PCI Journal, vol. 30, No. 6, p.p. 92-119, **1985**.
- [36] Minitab 17 Statistical Software [Computer software]. Incorporation, Minitab. **2017**.
- [37] Astm, C. 78/C 78M. "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)", West Conshohocken (PA): ASTM, 4, **2010**.
- [38] Darwin, D.; Barham, S.; Kozul, R.; Luan, S.; "Fracture energy of high-strength concrete", ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 5, p.p. 410-417, Sep. Oct, **2001**.
- [39] Giaccio, G.; de Sensale, G. R.; Zerbino, R.; "Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash", Cement and concrete composites, vol. 29, No. 7, p.p. 566-574, **2007**.
- [40] Bharatkumar, B. H.; Raghuprasad, B. K.; Ramachandramurthy, D. S.; Narayanan, R.; & Gopalakrishnan, S.; "Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete", Materials and Structures, vol. 38, No. 1, p.p. 63, **2005**.
- [41] Johari, M. M.; Brooks, J. J.; Kabir, S.; Rivard, P.; "Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete", Construction and Building Materials, vol. 25, No. 5, p.p. 2639-2648, **2011**.
- [42] Mazloom, M.; Ramezani-pour, A. A.; Brooks, J. J.; "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", Cement and Concrete Composites, vol. 26, No. 4, p.p. 347-357, **2004**.
- [43] CSA CAN3-A23.3. Design of concrete standards for buildings, 2004.
- [44] Comité Euro-International du Béton.; CEB-FIP model code 1990. London: Thomas Telford; **1993**.
- [45] Norwegian Council for Standardization. Concrete structures—design rules, NS3473, Oslo (Norway): Norges Standardiserings Forbund, **1992**.
- 240, **1998**.
- [20] Haque, M. N.; Kayali, O.; "Properties of high-strength concrete using a fine fly ash", Cement and Concrete Research, vol. 28, No. 10, p.p. 1445-1452, **1998**.
- [21] Jianyong, L.; Pei, T.; "Effect of slag and silica fume on mechanical properties of high strength concrete", Cement and Concrete Research, vol. 27, No. 6, p.p. 833-837, **1997**.
- [22] Özturan, T.; Çeçen, C.; "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths", Cement and Concrete Research, vol. 27, No. 2, p.p. 165-170. **1997**.
- [23] Zhou, F. P.; Barr, B. I. G.; Lydon, F. D.; "Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates", Cement and concrete research, vol. 25, No. 3, p.p. 543-552, **1997**.
- [24] Tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html.
- [25] ACI Committee 318.; "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89/ACI 318R-89) (Revised 1998)", ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Detroit, **1998**.
- [26] European Committee for Standardization.; Eurocode No. 2, "Design of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings", **2005**.
- [27] Standards Australia.; "Concrete structures", AS 3600, Sydney, Australia, **2009**.
- [28] Japan Society of Civil Engineers.; "Standard Specification for Concrete Structure", Japanese Society of Civil Engineering, No. 15, Tokyo, Japan, **2005**.
- [29] AASHTO.; Interim Bridge design specifications and commentary. Washington (DC), American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO), **2006**.
- [30] CEB-FIP.; High-strength concrete state of the art report. London: Thomas Telford, **1990**.
- [31] Akazawa, T.; "International association of testing and research laboratories for materials and structures", RILEM bull, vol. 13, p.p. 13-23, **1953**.
- [32] Carneiro, FL.; Lobo, B.; "Concrete Tensile Strength, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM)", Paris, Bulletin vol. 13, p.p. 97-123, **1953**.
- [33] Carino, N. J.; Lew, H. S.; "Re-

- 576-583, **2006**.
- [49] Jobse, H. J.; Moustafa, S. E.;  
“*Applications of high strength concrete for highway bridges*”, Precast Prestressed Concrete Institute Journal, vol. 29, No. 3. p.p. 44-73, **1984**.
- [50] Dinakar, P.; Babu, K. G.; Santhanam, M.;  
“*Mechanical properties of high-volume fly ash self-compacting concrete mixtures*”, Structural concrete, vol. 9, No. 2, p.p. 109-116, **2008**.
- [46] Spanish code for structural concrete EHE. Real Decreto 2661/1998, Madrid, **1998** (in Spanish).
- [47] Brazilian association of technical standards NBR 6118: design of concrete structures, Rio de Janeiro, **2003** (in Portuguese).
- [48] Einsfeld, R. A.; Velasco, M. S.;  
“*Fracture parameters for high-performance concrete*”, Cement and Concrete Research, vol. 36, No. 3, p.p.