

راستی آزمایی روابط مقاومت برشی آیین‌نامه‌های معتبر موجود برای بتن خودتراکم

محمد صادق محقق زاده دوانی اصل^۱، مهدی آرزومندی^{۲*}، شقایق افشار^۱، سید امید مبرقع^۱

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه، دانشگاه شهاب دانش، قم، ایران
 ۲- فوق دکترا سازه، دانشگاه اوکلاه‌های آمریکا و استادیار دانشگاه شهاب دانش، قم، ایران

چکیده

امروزه استفاده از بتن خودتراکم موضوع بسیاری از مطالعات می‌باشد. این مقاله مطالعات گذشته انجام شده در زمینه مقاومت برشی بتن خودتراکم را مورد بررسی قرار داده است. علاوه بر این، نتایج مقاومت برشی بتن خودتراکم با روابط مقاومت برشی آیین‌نامه‌های (آمریکا، اروپا، استرالیا و ژاپن) و همچنین روابط مکانیک شکست پیشنهادی برای مقاومت برشی توسط محققین گذشته مقایسه شده است. در انتها، نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم با بانک داده‌های مقاومت برشی بتن معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. جهت بررسی دقیق نتایج، از تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) جهت تعیین بهترین خط برازش شده و محدوده ۹۵ درصد داده‌ها استفاده شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، اروپا، استرالیا و ژاپن به ترتیب برای ۸۸، ۷۸، ۹۵ و ۱۰۰ درصد داده‌های بتن خود تراکم محافظه کارانه می‌باشد. حال آنکه روابط مکانیک شکست برای ۴۰ تا ۸۵ درصد داده‌های مقاومت برشی محافظه کارانه می‌باشد. علاوه بر آن، بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که فقط ۱۵٪ داده‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم خارج از محدوده ۹۵٪ داده‌های مقاومت برشی بتن معمولی قرار دارد.

کلمات کلیدی: مقاومت برشی، بتن خودتراکم، بتن معمولی، مکانیک شکست، تحلیل آماری

*نویسنده مسئول: مهدی آرزومندی

پست الکترونیکی: Arezoumandi@shahabdanesh.ac.ir

۱- مقدمه

عملکرد سازه ای بتن یکی از مسائلی است که سال‌ها توجه و تحقیقات را به خود اختصاص داده است. در ژاپن نیز سال‌های متعددی این موضوع مورد پژوهش قرار گرفته است. یکی از معیارهای مهم برای رسیدن به بتن با دوام مناسب، متراکم کردن بتن است. اما کاهش تعداد کارگران فنی و حرفه ای که بتوانند این کار را به نحو مناسب انجام دهند، مشکلات زیادی را در سالهای قبل بوجود آورده بود. یکی از راه‌های اساسی برای رفع این مشکل، استفاده از بتن‌هایی بود که بتوانند تحت وزن خود در قالب و در تمام زوایا و گوشه‌ها متراکم شوند، بدون اینکه نیاز به لرزش و نیروی خارجی داشته باشند. به این علت بتن خود تراکم نخستین بار در سال ۱۹۸۶ توسط اوکامورا (Okamura) در ژاپن پیشنهاد شد [1]. در پی آن مطالعات و آزمایش‌های اساسی در دانشگاه توکیو توسط اوزاوا (Ozawa) و میکاوا (Meakawa) برای توسعه این بتن صورت گرفت. اولین نمونه این نوع بتن در سال ۱۹۸۸ با استفاده از مواد و مصالح موجود در بازار ساخته شد. نام این نوع بتن توسط اوکامورا و همکارانش تحت عنوان «بتن خود تراکم توانمند» یا بطور خلاصه «بتن خود تراکم» نامگذاری شد. بررسی بر روی مشخصات مکانیکی توسط محققین در طول ۳۲ سال از اختراع این نوع بتن، بسیار انجام شده است اما مطالعه بر روی مشخصات سازه ای به مراتب کمتر می باشد. جدیدترین مطالعه انجام شده در مورد مشخصات سازه‌ای بتن خودتراکم توسط (Nasim Shatrat) و همکارانش در سال ۲۰۱۸ انجام شده است، که بر روی ۲۰ تیر با بتن خودتراکم آزمایش‌های مقاومت برشی و مکانیک شکست انجام دادند و نتایجی که به دست آوردند نشان دهنده افزایش ظرفیت برشی بین ۰.۵۸ تا ۱۶.۲۷ درصد برای خاموت‌هایی با فاصله ۲۰۰ میلیمتر و ۹.۳۷ تا ۱۶.۳۷ درصد برای خاموت‌هایی با فاصله ۱۵۰ میلیمتر و مشابه بودن مکانیک شکست تیرهای با بتن خودتراکم و بتن معمولی بوده است [۲]. این مطالعه مقاومت برشی بتن خودتراکم حاصل از نتایج آزمایشگاهی مطالعات گذشته را بررسی نموده و نتایج آن را با روابط آیین نامه ها و محققین گذشته مقایسه کرده است.

۲- مقاومت برشی

در این بخش با مروری بر مطالعات گذشته در زمینه مقاومت برشی بتن خودتراکم، نتایج آن با ضوابط آیین نامه های [3] ACI 318، [4] EC 2، [5] AS 3600 و [6] JSCE مقایسه شده است.

۱.۲ مروری بر مطالعات گذشته

Nasim sharatat et al [2]، در سال ۲۰۱۸ بیست تیر با ابعاد 400×200 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۲ و با درصدهای فولاد ۱,۴ تا ۱,۹ با بتن خودتراکم را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش آنان نشان داد که مقاومت برشی تیرهای با بتن خودتراکم ۱۶,۷ درصد بیشتر از بتن معمولی می باشد و مکانیک شکست تیرهایی با بتن خود تراکم و بتن معمولی تقریباً مشابه می باشد.

K.Sathiyamoorthy [7]، در سال ۲۰۱۶ شش تیر با ابعاد 150×100 ، 200×100 و 300×100 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۱,۰۵ و ۲,۱۴ و با درصدهای فولاد ۱,۶ با بتن خودتراکم را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایجی که از آزمایش به دست آوردند نشان داد که ظرفیت برشی بتن سبک خودتراکم کمتر از بتن خودتراکم معمولی می باشد.

Arezoumandi & Volz [8]، در سال ۲۰۱۴ بر روی دوازده تیر با ابعاد 460×300 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۳,۰ و با درصدهای فولاد ۲,۲۷ تا ۲,۷۱، بتن خود تراکم را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش تفاوت محسوسی در ظرفیت برشی بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی را نشان نداد.

Luigi Biolzi et al [9]، شانزده تیر با بتن خود تراکم را در سال ۲۰۱۴ با ابعاد 300×170 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۱,۵ تا ۴,۵ و با درصد فولاد ۰,۹ را تحت آزمایش برش قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش حاکی از مشابه بودن ظرفیت برشی بتن خودتراکم و بتن معمولی بود.

Helincks et al [10]، در سال ۲۰۱۳ با مطالعه بر روی سه تیر با ابعاد 1500×100 و با نسبت های عمق به دهانه مختلف از ۱,۸ تا ۳ و در صد فولاد ۱، ۱,۵ و ۲ به این نتیجه دست یافتند که مقاومت برشی تیرهای با بتن خودتراکم مساوی و یا حداکثر ۷ درصد کمتر از بتن معمولی می باشد.

Y.W.Choi et al [11]، در سال ۲۰۱۲ دو تیر با ابعاد مختلف 360×180 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۱,۴۳ و با در صد فولاد ۱,۵ با بتن خودتراکم را مورد آزمایش قرار دادند و برابر بودن ظرفیت برشی بتن خود تراکم با بتن معمولی را گزارش کردند.

A.A.A.Hassan et al [12]، در سال ۲۰۰۸ ۱۰ تیر با بتن خودتراکم با ابعاد مختلف 150×400 تا 750×400 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۰,۶ تا ۳,۹ و با درصد های فولاد ۱ و ۲ را مورد آزمایش قرار دادند که نتایج آزمایش برابر بودن ظرفیت برشی بتن خودتراکم با بتن معمولی را نشان می داد.

Choulli et al [13]، در سال ۲۰۰۸ شش تیر با ابعاد 750×500 میلیمتر با نسبت عمق به دهانه ۲,۱ و همچنین در صد فولاد ۰,۲ و ۰,۴ مورد آزمایش برش قرار دادند. نتایج آزمایش ها بر اساس روابط آیین نامه های مختلف محافظه کارانه (مقاومتی بیشتر از مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه) بود.

امید رضایی فر و همکاران [14]، در سال ۱۳۹۴ با بررسی بر روی ۶ تیر با ابعاد 200×180 میلیمتر و نسبت عمق به دهانه ۲,۵ و همچنین درصد فولاد ۲,۱ به این نتیجه دست یافتند که تیرهای با بتن خودتراکم مقاومت برشی بیشتری در مقایسه با بتن معمولی دارا می باشند. برای بررسی دقیق تر اثر طرح اختلاط بتن های خودتراکم بر رفتار برشی بتن، جدول ۱ طرح اختلاط مطالعات گذشته را نشان می دهد. همچنین جدول ۲ نیز به طور کامل جزئیات نمونه های مورد آزمایش در این مطالعه را نشان می دهد.

جدول شماره ۱: طرح اختلاط مطالعات گذشته (به نسبت وزن سیمان)

آهک	سرباره کوره آهن گدازی	میکروسیلیس	خاکستر بادی	درشت دانه	ریز دانه	نسبت آب به مواد سیمانی	محقق
-	۲,۸۵	۰,۰۹	۰,۱۵	۱,۵۹	۲,۳۱	۰,۳۲	K.Sathiyamoorthy
-	-	-	۰,۳۳	۳,۱۴	۱,۷۱	۰,۴۰	Arezoumandi & Volz
۰,۴۵	-	-	-	۴,۷۸		۰,۵۲	Luigi Biolzi et al.
۰,۶۶	-	-	-	۱,۹۳	۲,۳۶	۰,۲۷	Helincks et al.
۱,۰۰	-	-	-	۲,۳۲	۲,۸۴	۰,۲۷	
۰,۵۰	-	-	-	۱,۷۴	۲,۱۳	۰,۲۷	
-	۰,۱۳	-	۰,۲۰	۲,۴۶	۲,۱۹	۰,۳۷	Y.W.Choi et al.
-	۰,۴۲	-	-	۲,۸۵	۲,۹۵	۰,۴۰	A.A.A.Hassan et al.
۰,۳۵	-	-	-	۲,۳۲	۱,۵۳	۰,۲۴	Choulli et al.
۰,۳۳	-	۰,۱۱	-	۱,۹۱	۱,۴۷	۰,۲۶	امید رضایی فر و همکاران
۰,۳۳	-	۰,۱۱	-	۱,۶۵	۱,۲۷	۰,۲۵	

۲.۲ مقایسه مقاومت برشی بتن خودتراکم با روابط آیین نامه‌ها

آیین‌نامه‌های معتبر، مقاومت برشی در تیرهای بتن مسلح را حاصل از ظرفیت برشی بتن و میلگردهای عرضی (خاموت) می‌دانند. از آنجا که ظرفیت برشی حاصل از میلگردهای عرضی فقط به مشخصات میلگردهای عرضی (سطح مقطع، فاصله و حد جاری شدن) بستگی دارد، در این تحقیق فقط ظرفیت برشی حاصل از بتن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی اینکه روابط مقاومت برشی آیین‌نامه‌های موجود برای بتن خودتراکم نیز معتبر می‌باشند، در این بخش نتایج مقاومت برشی بتن خودتراکم حاصل از آزمایشگاه با روابط آیین‌نامه‌های (1) ACI 318، (2) EC 2، (3) AS 3600 و (4) JSCE مقایسه می‌گردد. میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی مطالعات ذکر شده به روابط آیین‌نامه‌های (1) ACI 318، (2) EC 2، (3) AS 3600 و JSCE به ترتیب برابر با ۱,۶۱، ۱,۴۵، ۱,۶۷ و ۲,۵۸ می‌باشد. همچنین روابط آیین‌نامه‌های آمریکا و اروپا به ترتیب برای ۱۲ و ۵ و استرالیا برای ۵ در صد داده‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم غیر محافظه‌کارانه هست (مقاومتی کمتر از مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه دارد)، در حالیکه برای آیین نامه ژاپن برای تمامی داده‌ها محافظه‌کارانه می‌باشد.

$$V_c = 0.17f_c^{0.5}b_w d \quad (1)$$

$$V_c = (0.18/\gamma_c) (1 + (200/d)^{0.5})(100\rho_f)^{0.33} b_w d \quad (2)$$

$$V_c = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_v f_{cv} (A_{st}/b_v d_o)^{0.33} \quad (3)$$

$$V_c = \beta_d \beta_p \beta_n f_{ved} b_w d / \gamma_b \quad (4)$$

۳.۲ مقایسه مقاومت برشی بتن خودتراکم با روابط پیشنهادی بر اساس مکانیک شکست

استفاده از تئوری مکانیک شکست برای پیش‌بینی مقاومت برشی بتن، یکی از روش‌های شناخته شده در این حوزه می‌باشد. در این بخش روابط پیشنهادی مقاومت برشی بر اساس روش‌های مکانیک شکست محققین گذشته، [15] Bazant et al، [16] Gastbled and May،

و [17] Xu et al. با نتایج آزمایش‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. معادلات ۵ تا ۷ به ترتیب روابط مکانیک شکست محققین گذشته Bazant et al.، Gastebled and May و Xu et al. را نشان می‌دهد. میانگین روابط آزمایشگاهی به روابط مکانیک شکست محققین گذشته برای Bazant et al.، Gastebled and May و Xu et al. به ترتیب برابر با ۱،۲۲، ۱،۶۰ و ۱،۰۷ می‌باشد. روابط مکانیک شکست Bazant et al.، Gastebled and May و Xu et al. به ترتیب برای ۵۴، ۱۵ و ۶۰ درصد داده‌ها غیرمحافظة کارانه می‌باشد.

$$V_c = 10\rho^{\frac{3}{8}} \left(1 + \frac{d}{a_s}\right) \sqrt{\frac{f'_c}{1 + \frac{d}{f'_c \cdot \frac{2}{3} \cdot 3800 \sqrt{d_a}}} b_w d} \quad (5)$$

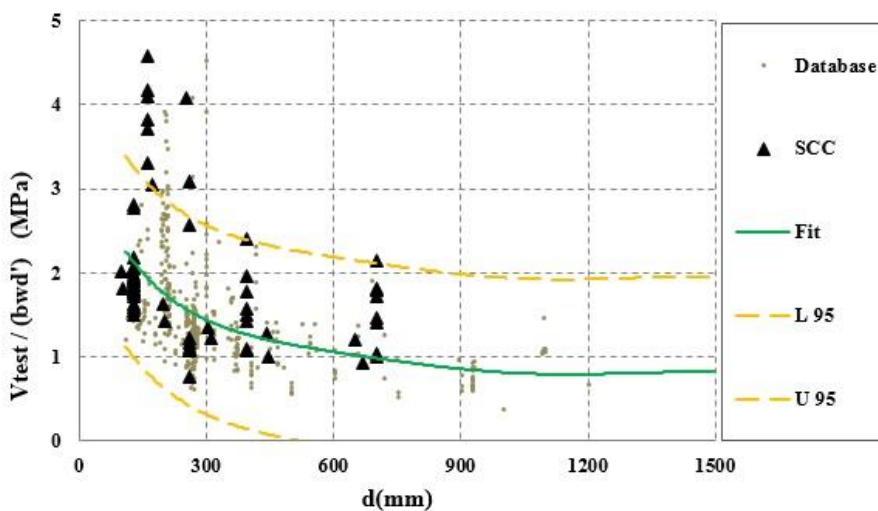
$$V_c = \frac{1.109}{\sqrt{d}} \left(\frac{d}{a_s}\right)^{\frac{1}{3}} \rho^{\frac{1}{6}} (1 - \sqrt{\rho})^{\frac{2}{3}} f'_c{}^{0.35} \sqrt{E_s} b_w d \quad (6)$$

$$V_c = \frac{1.018}{\sqrt{d}} \left(\frac{d}{a_s}\right)^{\frac{1}{3}} \rho^{\frac{1}{6}} (1 - \sqrt{\rho})^{\frac{2}{3}} (0.0255 f'_c + 1.24) b_w d \quad (7)$$

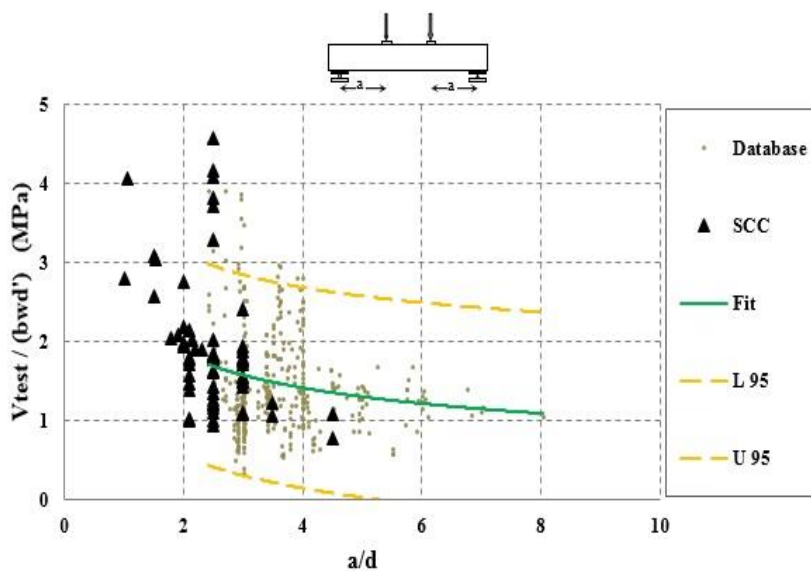
۴.۲ مقایسه مقاومت برشی بتن خودتراکم با بانک داده‌های گذشته بتن معمولی

چهار عامل اصلی در ظرفیت برشی تیر بتن مسلح عبارتند از: عمق تیر، نسبت دهانه برشی به عمق تیر، مقاومت فشاری بتن و درصد آرماتور طولی. جدول ۲، جزئیات تیرهای مطالعات گذشته شامل عرض مقطع، عمق موثر، ارتفاع مقطع، نسبت عمق به دهانه، حداکثر بعد سنگدانه، درصد فولاد طولی و مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. برای بررسی عوامل ذکر شده، اشکال ۱ تا ۴ ظرفیت برشی تیرهای ساخته شده از بتن خودتراکم را با بانک داده‌های بتن معمولی [18] مورد مقایسه قرار داده است.

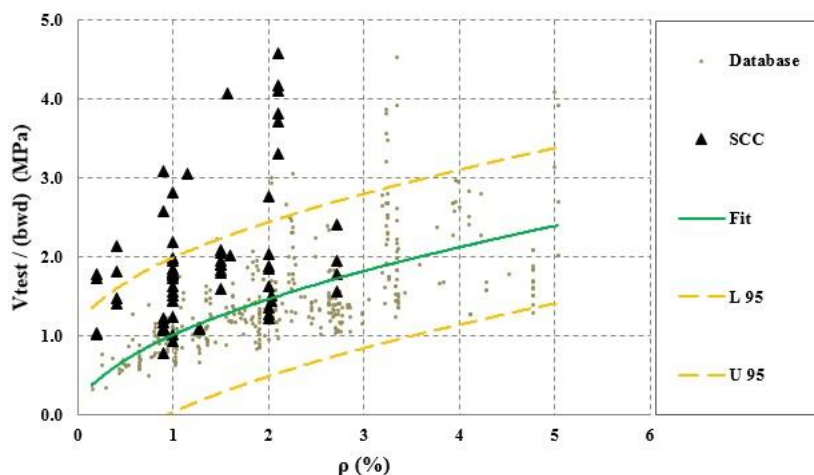
مقایسه بانک داده‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم با بتن معمولی (شکل‌های ۱ تا ۴) نشان می‌دهد که داده‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم دارای روند یکسانی با داده‌های بتن معمولی می‌باشند. به عبارت دیگر با افزایش عمق موثر و همچنین نسبت دهانه برشی به عمق موثر، مقاومت برشی کاهش می‌یابد علاوه بر آن با افزایش درصد آرماتورهای طولی و مقاومت فشاری بتن، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱ تا ۴، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم را با انبوه داده‌های مطالعات گذشته بتن معمولی برای پارامترهای ذکر شده مقایسه می‌کند. تحلیل‌های آماری انجام شده توسط نرم افزار Minitab 17.1.0 [19] بر روی این داده‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی منجر به ترسیم منحنی‌های بهترین خط برازش شده (Fit) و کران پایین (L95) و کران بالای ۹۵ درصد (U95) این داده‌ها در اشکال ۱ تا ۴ می‌شود. بررسی‌های آماری حاکی از آن است که فقط ۱۵٪ داده‌ها بالاتر از کران بالای محدوده ۹۵٪ داده‌های بتن معمولی قرار دارد.



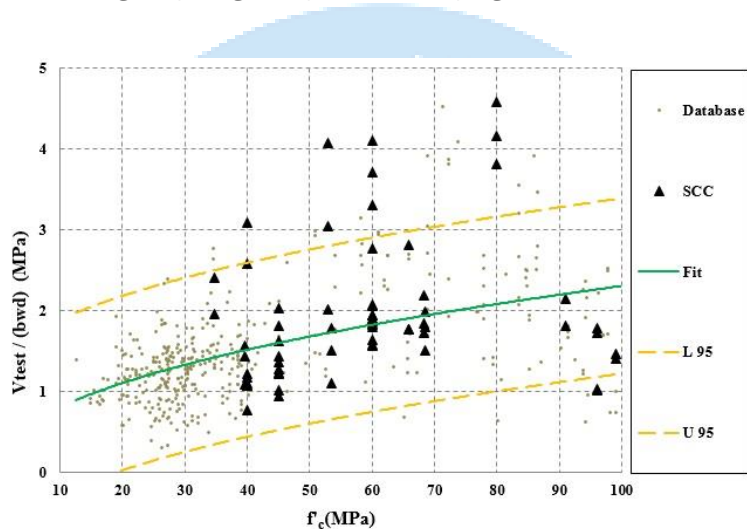
شکل ۱: مقایسه داده های مقاومت برشی بتن خودتراکم با بتن معمولی (تنش برشی - عمق موثر)



شکل ۲: مقایسه داده های مقاومت برشی بتن خودتراکم با بتن معمولی (تنش برشی - نسبت عمق به دهانه)



شکل ۳: مقایسه داده‌های مقاومت برشی بتن خودتراکم با بتن معمولی (تنش برشی - درصد فولاد طولی)



شکل ۴ - مقایسه داده‌های مقاومت برشی بتن خود تراکم با بتن معمولی (تنش برشی - مقاومت فشاری)

پارامترها :

a/d : نسبت عمق به دهانه

a_s : حداکثر بعد سنگدانه

A_{st} : سطح مقطع میلگرد طولی بر حسب میلیمتر مربع

b : عرض مقطع بر حسب میلیمتر

b_v : عرض مقطع بر حسب میلیمتر

d : ارتفاع موثر مقطع بر حسب میلیمتر

E_s : مدول الاستیسیته فولاد بر حسب مگاپاسکال

f_c : مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال

f_{ved} : مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال

h : ارتفاع مقطع بر حسب میلیمتر

- β_1 : ضریب اثر عمق
 β_2 : ضریب اثر نیروی محوری
 β_3 : ضریب اثر عمق به دهانه
 β_p : ضریب اثر عمق
 β_d : ضریب اثر نیروی محوری
 β_n : ضریب اثر آرماتور طولی
 ρ : درصد فولاد طولی
 γ_b : ضریب اثر آرماتور طولی
 γ_c : ضریب جرئی بتن

۵ - نتیجه گیری

بر اساس مقایسه صورت پذیرفته بین نتایج آزمایشگاهی مقاومت برشی بتن خودتراکم با روابط آیین نامه های موجود، روابط پیشنهادی مکانیک شکست و همچنین بانک داده های مقاومت برشی بتن معمولی با استفاده از تحلیل های آماری نتایج زیر به صورت خلاصه ارائه می گردد:

- ۱- برخی از مشاهدات و نتایج در تعدادی از مقالات حاکی از مشابه بودن ظرفیت برشی بتن خودتراکم و بتن معمولی می باشد.
- ۲- تعدادی از محققین کاهش ظرفیت برشی بتن خودتراکم را نسبت به بتن معمولی گزارش کردند.
- ۳- روابط آیین نامه های آمریکا و اروپا به ترتیب برای ۱۲ و ۲۲ و استرالیا برای ۵ در صد داده ها غیر محافظه کارانه می باشد (مقاومتی کمتر از مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه دارد)، در حالیکه روابط آیین نامه ژاپن برای تمامی داده ها محافظه کارانه می باشد.
- ۴- روابط مکانیک شکست Bazant et al., Gastebled and May، Xu et al. و به ترتیب برای ۵۴، ۱۵ و ۶۰ در صد داده ها غیر محافظه کارانه می باشد.
- ۵- ۸۵ درصد از نتایج آزمایش های مقاومت برشی تیرهای بتن خودتراکم در محدوده ۹۵٪ داده های مقاومت برشی بتن معمولی قرار دارد.

۶- مراجع

- [1] Okamura, H. (1997). "Self-compacting high-performance concrete." *Concrete. Int. Des. Construction.*, 19(7), pp. 50-54

- [2]] Nasim Shatarat, Hadeel Musa Mahmoud, Hasan Katkhuda. (2018). "Shear capacity investigation of self compacting concrete beams with rectangular spiral reinforcement ". *Construction and Building Materials*. Vol 189 pp. 640–648.
- [3] 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.
- [4] European Committee for Standardization. Eurocode No. 2, (2005). "Design of concrete structures. Part 1: *General Rules and Rules for Buildings*".
- [5] AS 3600-2009, (2009). "Concrete Structures," *Standards Australia*, Sydney.
- [6] Japan Society of Civil Engineers, (2005) "Standard Specification for Concrete Structure" *Japanese Society of Civil Engineering* No. 15, Tokyo.
- [7] Sathiyamoorthy, K., Hossain, K., and Lotfy, A. (2016). "Shear resistance of lightweight self-consolidating concrete beams", *Resilient Infrastructure*, pp. 399-410.
- [8] Arezoumandi, M. & Volz, J.S. (2014). "Shear Strength of Chemically Based Self-Consolidating Concrete Beams: Fracture Mechanics Approach versus Modified Compression Field Theory." *American Society of Civil Engineers*, pp. 713–720.
- [9] Biolzi, L., Cattaneo, S., and Mola, F. (2014). "Bending-shear response of self-consolidating and high-performance reinforced concrete beams", *Engineering Structures*, pp. 399-410.
- [10] Helincks, P. Boel, V, De Corte, W, S.B., De Schutter, G and Desnerck, P. (2013). "Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity", *Engineering Structure*, pp. 121-132.
- [11] Choi, Y.W., Lee, H.K., Chu, S.B., Cheong, S.H and Jung, W.Y. (2012). "Shear Behavior and Performance of Deep Beams Made with Self-Compacting Concrete", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, pp. 65-78.
- [12] Hassan, A., Hossain, K.M.A., and Lachemi, M. (2008). "Behavior of full-scale self-consolidating concrete beams in shear", *Cement & Concrete Composites*, pp. 588-596.
- [13] Choulli, Y and R.Mari, A. (2008). "Shear Behavior of full-scale prestressed i-beam made with self compacting concrete", *Materials and Structures*, pp. 131-141.
- [14] Rezaei far, O, Qods, A and Karimi, S. (1393). "An Observation into Shear Behavior of High Strength Self-Compacting Concrete", *Concrete Research Quarterly Journal*, pp. 55-69.
- [15] Bažant, Z. P., and Yu, Q., (2005) "Design against Size Effect on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Stirrups," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 131, No. 12, pp. 1877-1885.
- [16] Gastebled, O. J., and May, I. M., (2001) "Fracture Mechanics Model Applied to Shear Failure of Reinforced Concrete Beams without Stirrups," *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 2, pp. 184-190.
- [17] Xu, S., Zhang, X., and Reinhardt, H.s W., (2012) "Shear Capacity Prediction of Reinforced Concrete Beams without Stirrups Using Fracture Mechanics Approach," *ACI Structural Journal*, V. 109, No. 5, pp. 705-714.
- [18] Reineck, K. H., Kuchma, D. A., Kim, K. S., & Marx, S. (2003). Shear database for reinforced concrete members without shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, V.100(2), pp. 240–249
- [19] Minitab 17 Statistical Software (2013). [Computer software]. Incorporation, Minitab



جدول ۲: جزئیات تیرهای مطالعات گذشته

V	f_c	ρ	d_{max}	a/d	h	d	b	سال	محققین
KN	MPa	%	mm	-	mm	mm	mm	۲۰۱۸	Nasim Shatarat et al. [2]
۱۰۲,۵	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۱۰,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۲۰,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۴۵,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		

۲۵۵,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۳۵,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۴۰,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۳۵,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۲۰,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۱۰,۰	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۲۲,۵	۴۰	۱,۴	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۹۵,۵	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۱۵۷	۲۰۰		
۲۴۵,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۲۳۵,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۲۷۵,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۲۸۵,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۲۵۵,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۲۷۰,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۱۸۷,۵	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۱۰۹,۰	۴۰	۱,۹	۲۰	۲	۴۰۰	۹۴۰	۲۰۰		
۲۵,۰	۵۳	۱,۶	۱۰	۲,۱	۱۵۰	۱۲۴	۱۰۰	۲۰۱۶	K. Sathiyamoorthy et al. [7]
۵۳,۰	۵۳	۱,۲	۱۰	۱,۵	۲۰۰	۱۷۴	۱۰۰		
۱۰۳,۰	۵۳	۱,۶	۱۰	۱۱	۳۰۰	۲۵۳	۱۰۰		
۱۲۹,۹	۵۴	۱,۳	۱۹	۳,۰	۴۶۰	۳۹۵	۳۰۰	۲۰۱۴	Arezoumandi and Volz [8]
۱۲۸,۱	۴۰	۱,۳	۱۹	۳,۰	۴۶۰	۳۹۵	۳۰۰		
۱۷۷,۹	۵۴	۲,۰	۱۹	۳,۰	۴۶۰	۳۹۵	۳۰۰		
۱۶۹,۵	۴۰	۲,۰	۱۹	۳,۰	۴۶۰	۳۹۵	۳۰۰		
۲۱۰,۴	۵۴	۲,۷	۱۹	۳,۰	۴۶۰	۳۹۵	۳۰۰		
۱۸۵,۵	۴۰	۲,۷	۱۹	۳,۰	۴۶۰	۳۹۵	۳۰۰		
۱۱۳,۹	۴۰	۰,۹	۱۵	۱,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰	۲۰۱۴	Luigi Biolzi et al. [9]
۱۳۶,۲	۴۰	۰,۹	۱۵	۱,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		
۵۱,۹	۴۰	۰,۹	۱۵	۲,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		
۴۸,۹	۴۰	۰,۹	۱۵	۲,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		

۴۷,۳	۴۰	۰,۹	۱۵	۳,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		
۵۴,۰	۴۰	۰,۹	۱۵	۳,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		
۳۴,۰	۴۰	۰,۹	۱۵	۴,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		
۴۷,۶	۴۰	۰,۹	۱۵	۴,۵	۳۰۰	۲۶۰	۱۷۰		
۲۸,۴	۶۸	۱,۰	۸,۰	۲,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۴,۰	۶۸	۱,۰	۸,۰	۲,۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۲,۴	۶۸	۱,۰	۸,۰	۳,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۶,۷	۶۰	۱,۵	۸,۰	۱,۸	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۷,۰	۶۰	۱,۵	۸,۰	۱,۹	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۵,۳	۶۰	۱,۵	۸,۰	۲,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۰,۶	۶۰	۱,۵	۸,۰	۲,۱	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۴,۷	۶۰	۱,۵	۸,۰	۲,۲	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۴,۷	۶۰	۱,۵	۸,۰	۲,۳	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۳,۷	۶۰	۱,۵	۸,۰	۲,۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۳,۴	۶۰	۱,۵	۸,۰	۳,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۳۶,۰	۶۰	۲,۰	۸,۰	۲,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۴,۰	۶۰	۲,۰	۸,۰	۲,۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰	۲۰۱۳	Helincks et al. [10]
۲۴,۴	۶۰	۲,۰	۸,۰	۳,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۵,۳	۶۰	۱,۰	۸,۰	۲,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۱,۲	۶۰	۱,۰	۸,۰	۲,۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۰,۳	۶۰	۱,۰	۸,۰	۳,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۵,۷	۶۹	۱,۰	۸,۰	۲,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۳,۳	۶۹	۱,۰	۸,۰	۲,۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۱۹,۶	۶۹	۱,۰	۸,۰	۳,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۳۶,۵	۶۹	۱,۰	۸,۰	۱,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۳,۰	۶۹	۱,۰	۸,۰	۲,۵	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۲۲,۹۰	۶۹	۱,۰	۸,۰	۳,۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۰۰		
۳۵۸,۰	۵۲	۱,۵	۲۰	۱,۴	۳۶۰	۳۴۵	۱۸۰	۲۰۱۲	Y.W.Choi et al. [۱۱]
۳۹۸,۰	۵۲	۱,۵	۲۰	۱,۴	۳۶۰	۳۴۵	۱۸۰		
۷۴,۰	۴۵	۱,۰	۱۰	۲,۵	۱۵۰	۱۰۳	۴۰۰		
۸۱,۰	۴۵	۲,۰	۱۰	۲,۵	۱۵۰	۱۰۰	۴۰۰		
۱۱۶,۰	۴۵	۱,۰	۱۰	۲,۵	۲۵۰	۲۰۳	۴۰۰		
۱۲۸,۰	۴۵	۲,۰	۱۰	۲,۵	۲۵۰	۱۹۸	۴۰۰		
۱۵۳,۰	۴۵	۱,۰	۱۰	۲,۵	۳۶۳	۳۱۱	۴۰۰	۲۰۰۸	A.A.A. Hassan et al. [12]
۱۶۶,۰	۴۵	۲,۰	۱۰	۲,۵	۳۶۳	۳۰۶	۴۰۰		
۱۸۱,۰	۴۵	۱,۰	۱۰	۲,۵	۵۰۰	۴۴۸	۴۰۰		

۲۲۶,۰	۴۵	۲,۰	۱۰	۲,۵	۵۰۰	۴۴۳	۴۰۰		
۲۵۰,۰	۴۵	۱,۰	۱۰	۲,۵	۷۵۰	۶۶۸	۴۰۰		
۳۱۵,۰	۴۵	۲,۰	۱۰	۲,۵	۷۵۰	۶۵۱	۴۰۰		
۴۹۰,۰	۹۹	۰,۴	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰	۲۰۰۸	Choulli et al. [13]
۵۱۴,۰	۹۹	۰,۴	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۲۵۳,۰	۹۶	۰,۲	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۳۶۱,۰	۹۶	۰,۲	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۶۲۵,۰	۹۶	۰,۲	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۶۰۵,۰	۹۶	۰,۲	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۶۳۲,۰	۹۱	۰,۴	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۷۴۹,۰	۹۱	۰,۴	۱۲	۲,۱	۷۵۰	۷۰۰	۵۰۰		
۱۱۸,۰	۶۰	۲,۱	۲۰	۲,۵	۲۰	۱۶۰	۱۸۰	۱۳۹۴	امید رضایی فرو همکاران [14]
۱۰۷,۰	۶۰	۲,۱	۲۰	۲,۵	۲۰	۱۶۰	۱۸۰		
۹۵,۰	۶۰	۲,۱	۲۰	۲,۵	۲۰	۱۶۰	۱۸۰		
۱۳۲,۰	۸۰	۲,۱	۲۰	۲,۵	۲۰	۱۶۰	۱۸۰		
۱۲۰,۰	۸۰	۲,۱	۲۰	۲,۵	۲۰	۱۶۰	۱۸۰		
۱۱۰,۰	۸۰	۲,۱	۲۰	۲,۵	۲۰	۱۶۰	۱۸۰		

