

بررسی آماری و آزمایشگاهی مقاومت ضربه‌ای و میزان جذب انرژی در بتن‌های با مقاومت بالا

احمد دالوند^۱ و عباس سیوندی‌پور^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه صنعتی تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران
dalvand.a@lu.ac.ir

چکیده: در تحقیق حاضر یک بررسی آزمایشگاهی و آماری بر روی مقاومت ضربه‌ای و خصوصیات مکانیکی بتن دارای میکروسیلیس انجام شده است. سه سری بتن که به ترتیب دارای صفر، ۷ و ۱۴ درصد میکروسیلیس بودند ساخته شد. در مجموع ۲۸۸ نمونه بتنی در سه گروه ساخته شد. از هر طرح اختلاط ۲۰ نمونه مکعبی، ۲۰ نمونه استوانه‌ای، ۲۰ نمونه تیر کوچک و ۳۶ نمونه دیسک کوچک به ارتفاع ۶۴ میلیمتر و قطر ۱۵۰ میلیمتر ساخته شد. از نمونه‌های مکعبی به منظور تعیین مقاومت فشاری، از نمونه استوانه‌های کوچک برای تعیین مقاومت کششی دونیم شدن، از تیرهای کوچک به منظور تعیین مقاومت خمشی و از دیسک‌های کوچک جهت تعیین مقاومت ضربه‌ای استفاده گردید. آزمایش ضربه با استفاده از روش وزنه افتان که به وسیله آیین‌نامه ACI 544 پیشنهاد شده، انجام گرفت. آنالیز آماری صورت گرفته بر روی خصوصیات مکانیکی نشان داد خصوصیات مکانیکی و مقاومت ضربه‌ای با افزودن میکروسیلیس افزایش و ضریب تغییرات کاهش داشته است. به عبارت دیگر با افزایش میزان میکروسیلیس در بتن پراکندگی بین داده‌های آماری کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، مقاومت اولین ترک، مقاومت انهدام، مقاومت ضربه‌ای، جذب انرژی.

Assessment of Statistical Variations in Experimental Impact Resistance and Energy Absorption of High Strength Concrete

A. Dalvand and A. Sivandipour

Abstract: Silica fume as new supplementary cement material has several effects on initial mechanical strength and long term improvement in durability. In this paper, the impact resistance and mechanical properties of concrete mixed with silica fume are statistically investigated by preparing 288 specimens in three mix designs. The silica fume replaced 0, 7 and 14% of Portland cement by weight in mixed designs. Samples were made in different shapes including twenty cube, twenty cylindrical, and thirty-six 150×64-mm discs, casting from each batch for different test purposes. Cubic and cylindrical samples were used to determine the compressive strength and prismatic specimens were tested to obtain rupturing tensile. Also, cylindrical cutting specimens were subjected to the drop-weight test following the ACI committee 544 to determine impact strength of mixed concretes. Experimental data on the mechanical properties of different mixes indicate that silica fume improves mechanical properties and impact resistance while statistical analysis done based on these experimental tests showed the reduction of coefficient of variation values. In other words, adding silica fume improves statistical dispersion of data.

Keywords: Compressive Strength, First Crack Strength, Failure Strength, Impact Resistance, Energy Absorption.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بتن مقاومت بالا به‌طور گسترده‌ای در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. عبارت "بتن مقاومت بالا" به بتن‌هایی اطلاق می‌گردد که مقاومت بالاتر از ۴۲ مگا پاسکال داشته باشند [۱]. یکی از روش‌های تولید بتن مقاومت بالا استفاده از مواد پوزولانی نظیر میکرو سیلیس به‌جای سیمان می‌باشد. استفاده از میکرو سیلیس در بتن باعث بهبود خواص مکانیکی بتن می‌گردد [۲ تا ۸]. میکرو سیلیس یکی از پرکاربردترین مواد پوزولانی می‌باشد که افزودن آن به بتن موجب کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن می‌گردد [۹ تا ۱۱]. مطالعات زیادی بر روی خصوصیات مکانیکی بتن دارای میکرو سیلیس انجام شده است [۱۲ تا ۱۸] اما بررسی‌های آماری بسیار محدودی بر روی خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای این نوع بتن انجام گرفته است [۱۹]. مطالعات بسیار محدودی بر روی اثرات افزودن میکرو سیلیس بر پراکندگی داده‌هایی نظیر مقاومت فشاری صورت گرفته است. همچنین داده‌های آماری بسیار کمی بر روی اثرات میکرو سیلیس بر روی مقاومت ضربه‌ای و جذب انرژی وجود دارد. چندین روش تست به‌منظور تعیین مقاومت ضربه‌ای و شکنندگی بتن و مصالح مشابه وجود دارد [۲۰ تا ۲۳]. اما هیچ‌کدام از این تست‌ها به دلیل کمبود داده‌های آماری، به‌عنوان یک آزمایش استاندارد شناخته نمی‌شوند. آیین‌نامه ACI 544 [۲۴] یک آزمایش وزنه افتان را برای ارزیابی مقاومت ضربه‌ای بتن پیشنهاد داده است. این تست به دلیل سادگی و ارزان بودن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد اما داده‌های به‌دست‌آمده از این آزمایش غالباً دارای پراکندگی زیادی می‌باشند. اکثر داده‌های به‌دست‌آمده از این آزمایش دارای ضریب تغییرات بزرگتر از ۲۵ درصد می‌باشند.

۲- ضرورت تحقیق

اکثر داده‌های آماری موجود که حاصل آزمایش وزنه افتان مطابق کمیته ACI 544 می‌باشند، در خصوص بتن‌های الیافی هستند [۲۵ تا ۲۶]. داده‌های آماری بسیار محدودی در خصوص آزمایش وزنه افتان بتن‌های دارای میکرو سیلیس موجود می‌باشد. از این‌رو بررسی آماری تأثیر افزودن میکرو سیلیس بر رفتار ضربه‌ای و جذب انرژی بتن و اثرات آن بر پارامترهای آماری ضروری به نظر می‌رسد. همچنین به دلیل فقدان اطلاعات آماری، رابطه مشخصی بین مقدار

میکرو سیلیس مصرفی در بتن و جذب انرژی وجود ندارد. از طرفی از داده‌های موجود به‌منظور بررسی خصوصیات آماری بتن از قبیل میانگین و انحراف از معیار و ضریب تغییرات نمی‌توان استفاده کرد. لذا بررسی اثرات اضافه کردن میکرو سیلیس بر پارامترهای آماری بتن ضروری به نظر می‌رسد.

۳- روش انجام آزمایش

در این تحقیق ۳ سری نمونه بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ ساخته شد. نمونه‌های ساخته‌شده به ترتیب از A1 تا A3 شماره‌گذاری شدند. سری اول (A1) به‌عنوان مرجع فاقد میکرو سیلیس می‌باشد. در ساخت بتن سری‌های A2 و A3 به ترتیب از میکرو سیلیس به میزان ۷ و ۱۴ درصد وزن سیمان (جایگزین بخشی از سیمان) استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه‌های بتنی با سن ۲۸ روزه می‌باشد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلیمتر مطابق با ASTM C 39 انجام شد. مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها مطابق روش پیشنهاد شده در ACI committee 544 تعیین گردید. به این منظور برای هر طرح اختلاط بتن، ۹ نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد 150×300mm ساخته شد و هر نمونه استوانه‌ای به‌وسیله تیغه‌های الماس به چهار دیسک به طول ۶۴ میلیمتر تقسیم گردید. دیسک‌های بتنی بریده‌شده از نمونه استوانه‌ای درون دستگاه قرار داده شدند و یک چکش به وزن ۴/۴۵ کیلوگرم به‌طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلیمتر بر روی یک توپ فولادی به قطر ۶۳/۵ میلیمتر رها می‌شد. تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل روئیت و انهدام نهایی دیسک بتنی می‌شد، ثبت گردید. در هر آزمایش تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل روئیت می‌شد به‌عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن انهدام نهایی نمونه می‌شد به‌عنوان مقاومت انهدام در نظر گرفته می‌شود.

۴- خصوصیات مصالح مصرفی

در این کار آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II (ASTM Type II) تولید شده توسط کارخانه سیمان شاهرود و میکرو سیلیس تولیدی کارخانه فرو سیلیس سمنان استفاده شد. خصوصیات سیمان و میکرو سیلیس استفاده‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. در این کار آزمایشگاهی از سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه با حداکثر اندازه ۹/۵ میلیمتر و

جدول ۳: مشخصات طرح‌های اختلاط

نام طرح	جریان اسلامپ (mm)
A1	۷۰
A2	۶۰
A3	۶۵

۵- مقاومت کششی نمونه‌ها

آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش دونیم شدن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلیمتر مطابق با ASTM C 496 انجام گردید. در شکل ۱ یک سری از نمونه‌های قبل از انجام تست نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق این جدول، اضافه کردن میکرو سیلیس موجب افزایش مقاومت کششی متوسط در نمونه‌ها شده است. گروه A3 (دارای ۱۴ درصد میکرو سیلیس) دارای بیشترین مقدار متوسط مقاومت کششی در بین گروه‌های دیگر می‌باشد. مقاومت کششی میانگین برای گروه‌های ۱ تا ۳ به ترتیب ۳/۶۹، ۴/۰۲ و ۴/۹۶ مگا پاسکال می‌باشد. بیشترین و کمترین بازه تغییرات داده‌ها (Max-Min) به ترتیب مربوط به گروه سوم و دوم به مقدار $1/93$ و $1/54$ مگا پاسکال می‌باشد. گروه اول و سوم به ترتیب دارای بیشترین و کمترین ضریب تغییرات می‌باشند. ضریب تغییرات به‌عنوان شاخص پراکندگی داده‌ها، برای گروه سوم $7/99$ درصد می‌باشد که به ترتیب $5/1$ و $2/7$ درصد از گروه‌های اول و دوم کمتر می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر سیلیکا فوم موجب کاهش پراکندگی داده‌های آماری مربوط به مقاومت کششی می‌گردد. در شکل ۲ هیستوگرام مربوط به داده‌های نشان داده شده است.

۶- مقاومت خمشی نمونه‌ها

مقاومت خمشی از طریق آزمایش خمش یک تیر به ابعاد $320 \times 80 \times 60$ میلیمتر محاسبه گردید. مطابق ASTM C78 مدول گسیختگی نمونه‌های بتنی محاسبه می‌گردد. به‌منظور تعیین مقاومت خمشی نمونه‌ها شصت نمونه تیر مطابق شکل ۳ تست گردید. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بر روی ۶۰ نمونه در سه گروه A1 تا A3 در جدول ۵ ارائه گردیده است. مطابق این جدول گروه سوم که دارای ۱۴ درصد میکرو سیلیس می‌باشد دارای بیشترین

سنگ‌دانه‌های ریزدانه با مدول ریزی $3/4$ استفاده گردید. وزن مخصوص و جذب آب سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب $2/69$ و $0/56$ و $2/61$ و $1/92$ می‌باشد. به‌منظور افزایش کارایی بتن اختلاط از یک فوق روان کننده بانام تجاری Mape110 استفاده شد. رویه ساخت بتن به‌قرار زیر می‌باشد: ابتدا سیمان (یا سیمان و میکرو سیلیس) به همراه سنگ‌دانه‌های ریزدانه به مدت یک دقیقه مخلوط شدند. در مرحله بعد روان کننده به همراه نیمی از آب به مخلوط اضافه شده و به مدت دو دقیقه مخلوط شدند. درنهایت سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه به همراه باقی‌مانده آب به مخلوط اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. درصد مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴- کارایی نمونه‌ها

آزمایش اسلامپ به‌منظور تعیین پایداری بتن تازه بر روی تمامی طرح اختلاط‌ها انجام گردید. نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ بر روی ۳ سری بتن در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مقادیر اسلامپ بتن با افزایش درصد میکروسیلیس به آن کاهش می‌یابد. میکرو سیلیس از جریان یافتن بتن تازه ممانعت کرده و موجب کاهش در کارایی بتن می‌گردد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و میکروسیلیس

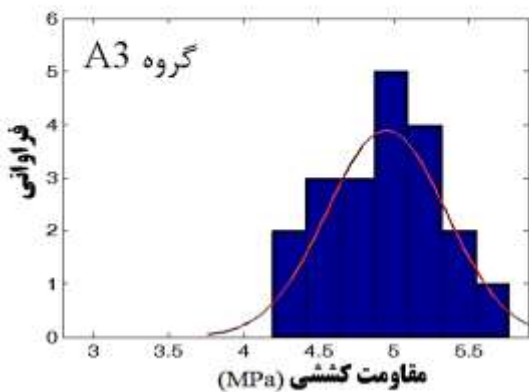
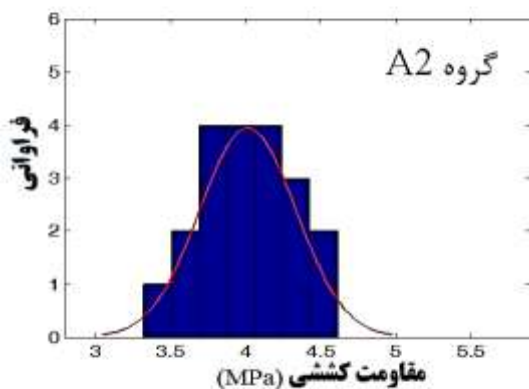
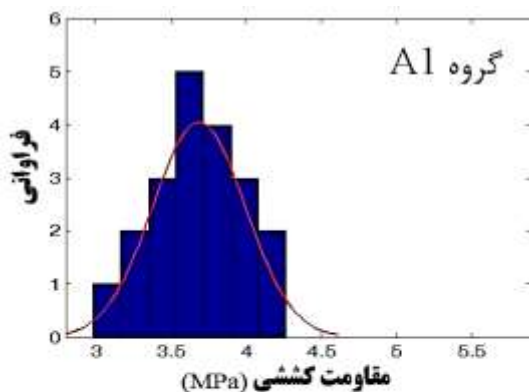
ترکیبات	سیمان	میکرو سیلیس
SiO ₂	۲۱/۱	۸۵-۹۵
Al ₂ O ₃	۴/۳۷	۰/۵-۱/۷
Fe ₂ O ₃	۳/۸۸	۰/۴-۲
MgO	۱/۵۶	۰/۱-۰/۹
K ₂ O	۰/۵۲	۰/۱۵-۱/۰۲
Na ₂ O	۰/۳۹	۰/۱۵-۰/۲
CaO	۶۳/۳۳	-
C ₃ S	۵۱	-
C ₂ S	۲۲/۷	-
C ₃ A	۵/۱	-
C ₄ AF	۱۱/۹	-
مشخصات فیزیکی		
وزن مخصوص ($\frac{gr}{cm^3}$)	۳/۱	۲/۲۱
سطح مخصوص ($\frac{cm^2}{gr}$)	۳۰۰۰	۱۴۰۰۰

دارای توزیع تقریباً نرمالی می‌باشد. همان طوری که ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، مقاومت خمشی و کششی آنها نیز افزایش می‌یابد.

مقدار متوسط در بین دو گروه دیگر است. همچنین در شکل ۴ نمودار هیستوگرام مربوط به مدول گسیختگی نمونه‌های سری A1 و A2 و A3 نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که مدول گسیختگی برای سه گروه

جدول ۲: مشخصات طرح‌های اختلاط (kg/m)

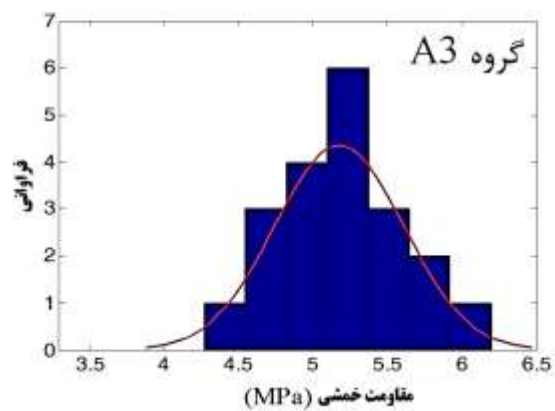
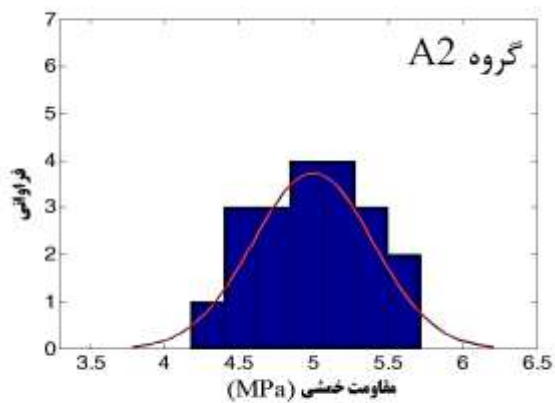
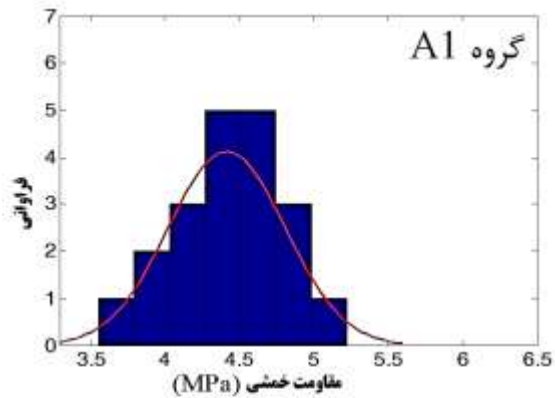
ردیف	نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	آب	سیمان	میکروسیلیس	ریزدانه	درشتدانه	فوق روان کننده
۱	A1	۰/۴۴	۱۶۵	۳۷۵	۰	۹۸۰	۹۸۰	۳/۹
۲	A2	۰/۴۴	۱۶۵	۳۴۸	۲۶	۹۸۰	۹۸۰	۳/۹
۳	A3	۰/۴۴	۱۶۵	۳۲۲	۵۳	۹۸۰	۹۸۰	۳/۹



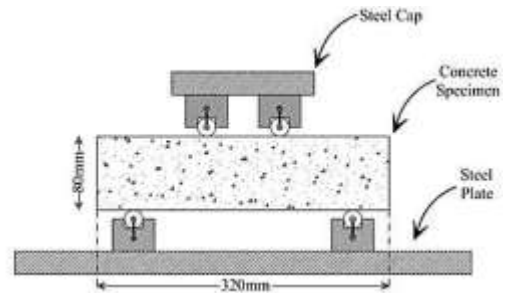
جدول ۴: مقاومت کششی نمونه‌های گروه سوم

شماره نمونه‌ها	مقاومت کششی (MPa)		
	A1	A2	A3
۱	۳/۲۶	۴/۱۷	۴/۷۵
۲	۲/۹۹	۴/۳۴	۴/۸۴
۳	۳/۷۱	۴/۵	۵/۷۸
۴	۳/۵۵	۴/۰۲	۴/۴
۵	۳/۳۴	۴/۲۳	۴/۴۶
۶	۳/۴۴	۴/۲۸	۵/۲۵
۷	۳/۵۱	۳/۵۷	۵/۴۵
۸	۳/۸۴	۴/۱	۴/۹۷
۹	۳/۷۱	۳/۹۲	۵/۴۳
۱۰	۳/۸۶	۳/۸۴	۴/۲
۱۱	۳/۴۳	۳/۷۹	۴/۹
۱۲	۳/۶۲	۳/۶۶	۵/۰۹
۱۳	۳/۶۶	۳/۳۲	۵/۱۵
۱۴	۳/۷۲	۴/۳۴	۴/۷۴
۱۵	۳/۸۴	۳/۷۷	۵/۱۶
۱۶	۴	۳/۸۴	۵/۰۳
۱۷	۴/۱	۳/۹۲	۵/۰۹
۱۸	۳/۹۲	۴/۰۳	۵/۲۷
۱۹	۴/۲۷	۴/۱۱	۴/۶۳
۲۰	۴	۴/۶۲	۴/۵۴
میانگین (MPa)	۳/۶۹	۴/۰۲	۴/۹۶
انحراف از معیار	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۴
درصد تغییرات	۸/۳۸	۸/۲۱	۷/۹۹

شکل ۲: توزیع نتایج تست مقاومت دونیم شدن



شکل ۴: هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش نرمال مقاومت خمشی سه گروه



شکل ۳: دستگاه تست خمشی ۴ نقطه‌ای

جدول ۵: مدول گسیختگی سه گروه

شماره نمونه‌ها	مدول گسیختگی (MPa)		
	A1	A2	A3
۱	۴/۱۴	۵/۵۵	۴/۷
۲	۴/۳۱	۵/۴۶	۵/۱۹
۳	۳/۵۶	۵/۷۲	۴/۶۷
۴	۴/۵۸	۵/۱۶	۵/۲۶
۵	۴/۵۶	۴/۷۴	۵/۱۳
۶	۴/۳۴	۵/۴۵	۴/۶۹
۷	۴/۳۹	۵/۰۶	۵/۰۸
۸	۴/۷۷	۴/۵۴	۴/۲۷
۹	۴/۸۸	۵/۱۸	۵/۷
۱۰	۴/۵۲	۴/۶	۵/۰۶
۱۱	۵/۲۲	۴/۷۵	۵/۱۳
۱۲	۳/۹۴	۴/۹۵	۵/۲۶
۱۳	۴/۷	۴/۹۵	۵/۱۹
۱۴	۴/۳۹	۴/۵۳	۶/۲
۱۵	۴/۹۴	۴/۸۹	۴/۹۲
۱۶	۴/۵۳	۵/۲۴	۵/۷۹
۱۷	۴/۱۴	۵/۴۴	۵/۳۸
۱۸	۴/۳۳	۴/۹۳	۵/۴۸
۱۹	۳/۸۱	۴/۶۳	۵/۰۳
۲۰	۴/۲۶	۴/۱۸	۵/۴۲
میانگین (MPa)	۴/۴۱	۴/۹۸	۵/۱۸
انحراف از معیار	۰/۳۹	۰/۴۳	۰/۴۱
درصد تغییرات	۸/۹۲	۸/۵۸	۸/۳۷

شکل ۶ هیستوگرام مربوط به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۶۰ نمونه مربوط به سه طرح اختلاط نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، نتایج هر سه سری بتن تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشند و به خوبی بر منحنی توزیع نرمال منطبق هستند. نمونه‌های سری A3 که دارای ۱۴ درصد میکرو سیلیس می‌باشند، در بین گروه‌های دیگر دارای میانگین مقاومت فشاری بالاتری می‌باشند. مقدار میانگین مقاومت فشاری برای سری A3 به ترتیب ۱۴ و

۷- مقاومت فشاری

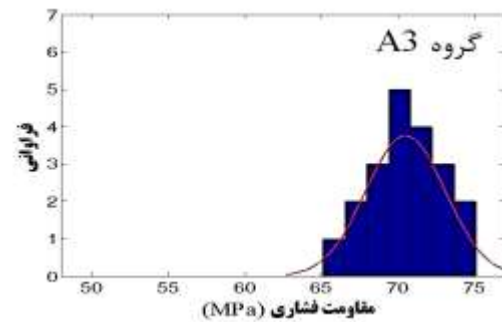
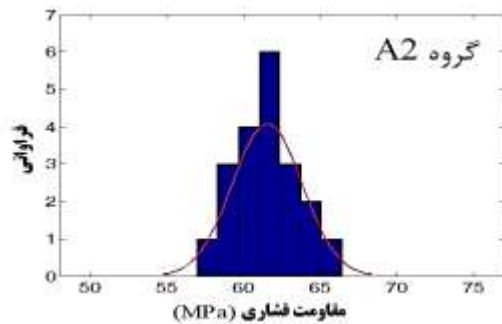
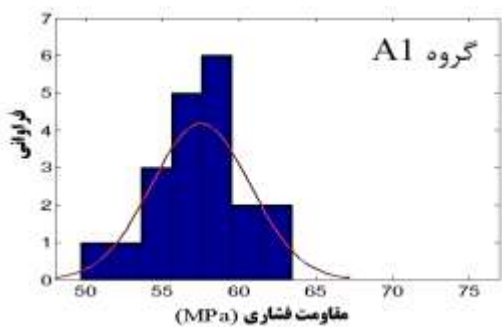
آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی بر طبق ASTM C 39 انجام گردید. یک سری از نمونه‌ها و دستگاه تست در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با اضافه نمودن میکرو سیلیس مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. در

قابل پذیرش می‌باشد [27]. مقادیر ضریب تغییرات گواه خوب بودن کیفیت بتن و کنترل کیفیت خوب نمونه‌ها می‌باشد. مقادیر ضریب تغییرات به دست آمده برای سه سری نمونه از حداکثر مقدار ۱۵٪ که به وسیله Swamy and Stavrides [28] پیشنهاد شده کمتر می‌باشد. علاوه بر آن Day [27] پیشنهاد می‌دهد که یک ضریب تغییرات بین کوچک‌تر از ۱۰٪ نشان‌دهنده یک کنترل کیفیت مناسب می‌باشد. در واقع افزودن میکرو سیلیس به نمونه‌ها موجب می‌گردد تا یکپارچه بتن بیشتر شده و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پراکندگی داده‌ها کمتر می‌شود. میکرو سیلیس به علت دارا بودن دانه‌های ریزی که ابعاد آن در حد میکرو می‌باشد، می‌تواند حفرات بین ماتریس سیمان و سنگدانه‌های ریز را از لحاظ ابعادی بپوشاند [28]. این برقراری اتصال بهتر بین سنگدانه‌ها و ماتریس سیمان، موجب افزایش مقاومت و کاهش پراکندگی داده‌های آماری می‌شود [28].

۲۲ درصد بیشتر از گروه‌های A1 و A2 می‌باشند و همچنین مقاومت فشاری میانگین گروه A2، ۷ درصد بیشتر از گروه A1 می‌باشد. ضریب تغییرات گروه سوم به ترتیب ۳۵ و ۳ درصد کمتر از گروه‌های اول و دوم می‌باشد. گروه A1 از بین دو گروه دیگر دارای بیشترین مقدار انحراف از معیار برای مقاومت فشاری می‌باشد به طوری که مقدار انحراف از معیار گروه A1 به ترتیب ۹ و ۲۶ درصد بیشتر از گروه‌های A2 و A3 می‌باشند. حداکثر انحراف از معیار مربوط به گروه A1 می‌باشد که به ترتیب ۱۷ و ۵۳ درصد بیشتر از گروه‌های A2 و A3 می‌باشند. ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقدار میکرو سیلیس در نمونه‌های بتنی، انحراف از معیار و ضریب تغییرات مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. کاهش این دو ضریب انحراف از معیار کلی بین سه سری طرح اختلاط بتن نشان‌دهنده کیفیت خوب نمونه‌های بتنی ساخته شد می‌باشد. در ضوابط پذیرش مقاومت فشاری بتن یک انحراف معیار ۴ تا ۶ مگا پاسکال

جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شماره نمونه‌ها	مقاومت فشاری (MPa)		
	A1	A2	A3
۱	۵۸/۱۲	۶۲/۱۵	۷۳/۲۲
۲	۵۳/۱	۶۱/۱	۷۳/۳۹
۳	۵۷/۴۴	۶۰/۴۳	۷۱/۹۸
۴	۵۵/۷۶	۶۳/۲۱	۷۵/۱۱
۵	۶۱/۱۵	۶۴/۲۸	۷۰/۱۵
۶	۵۸/۵۲	۶۴/۴۹	۷۲/۰۵
۷	۵۴/۳۲	۶۰/۸۱	۶۹/۹۴
۸	۵۸/۵۹	۶۲/۱۵	۶۶/۵۶
۹	۶۰/۹۵	۶۳/۲۱	۷۳/۷
۱۰	۵۵/۷۸	۶۱/۵۴	۷۰/۰۶
۱۱	۵۴/۸۶	۵۸/۷۶	۶۹/۷۷
۱۲	۵۵/۱۸	۶۰/۸۲	۷۲/۱۸
۱۳	۶۲/۱۳	۶۵/۹۲	۶۷/۹۷
۱۴	۶۳/۴۷	۶۰/۸۵	۶۶/۸۵
۱۵	۵۸/۳۲	۵۸/۵۵	۷۰/۰۱
۱۶	۵۹/۰۶	۶۱/۱۵	۷۱/۱۶
۱۷	۴۹/۶۲	۵۸/۸۶	۷۲/۵۴
۱۸	۵۷/۴۱	۶۶/۴۲	۶۵/۱
۱۹	۵۸/۷۶	۶۱/۲۳	۶۸/۹۲
۲۰	۵۷	۶۳/۵۵	۶۹/۲۹
میانگین (MPa)	۵۷/۴۷	۶۱/۱۵	۷۰/۴۹
انحراف از معیار	۳/۲۴	۲/۳۱	۲/۶۰
درصد تغییرات	۵/۶۴	۳/۷۸	۳/۶۹



شکل ۶: توزیع نتایج آزمایش مقاومت فشاری

۸- مقاومت ضربه‌ای

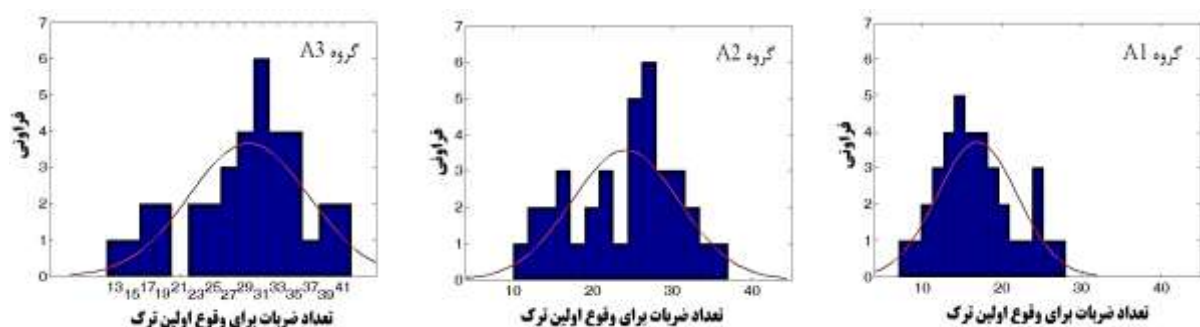
نتایج آزمایش وزنه افتان بر روی ۱۰۸ دیسک در سه گروه ۳۶ تایی که هر گروه مربوط به یک طرح اختلاط می‌باشد، در جدول ۷ تا ۹ نشان داده شده است. در شکل ۷-الف دستگاه تست ضربه و در شکل ۷-ب یک گروه از ۳۶ تایی از نمونه‌ها قبل از تست ضربه نشان داده شده است. در شکل ۷-ج گوی و کلاهک فلزی دستگاه تست ضربه نشان داده شده است.



شکل ۷: دستگاه تست ضربه، نمونه‌ها و کلاهک فلزی

۸-۱- مقاومت اولین ترک

مطابق جدول ۴ تا ۶ متوسط مقاومت اولین ترک در گروه سوم بیش از سایر گروه‌ها می‌باشد. همچنین متوسط مقاومت اولین ترک در گروه سوم حدوداً $1/3$ برابر گروه اول و $1/1$ برابر دوم می‌باشد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، اضافه کردن میکرو سیلیس موجب افزایش مقاومت اولین ترک می‌گردد. مقادیر انحراف از معیار برای گروه‌های یک تا سه به ترتیب ۵، $2/9$ و $3/3$ می‌باشد. همچنین مقادیر ضریب تغییرات نیز برای گروه‌های A1 تا A3 به ترتیب $29/9$ ، $14/6$ و $14/62$ درصد می‌باشد. در شکل ۸ نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک برای هر سه سری بتن به همراه منحنی توزیع نرمال مشاهده می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد برای هر سه گروه مقادیر اولین ضربات به‌سختی بر منحنی توزیع نرمال منطبق می‌باشد. در نمونه‌های گروه اول نسبت به سه گروه دیگر انطباق بیشتری بین مقادیر مقاومت اولین ترک و منحنی توزیع نرمال ملاحظه می‌گردد.



شکل ۸: هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش توزیع نرمال مقاومت اولین ترک سه گروه

جدول ۷: نتایج تست مقاومت ضربه‌ای و مقاومت نهایی پیش‌بینی شده برای گروه A1

شماره نمونه‌ها	نتایج تست مقاومت ضربه‌ای-گروه A1					مقاومت نهایی پیش‌بینی شده		
	FC تعداد ضربات برای مقاومت ترک اول	UR تعداد ضربات برای مقاومت انهدام	PINPB (blows)	انرژی ضربه‌ای (kN.mm)		UR	پیش‌بینی ۹۵ درصد برای تعداد ضربات لازم شکست نمونه‌ها	
				FC	UR		کران پایین پیش‌بینی شده	کران بالای پیش‌بینی شده
۱	۱۱/۰	۱۶/۰	۴۵/۵	۲۲۳/۶	۳۲۵/۳	۱۳	۱۰	۱۶
۲	۱۲/۰	۱۳/۰	۸/۳	۲۲۴/۰	۲۶۴/۳	۱۴	۱۱	۱۷
۳	۲۵/۰	۲۸/۰	۱۲/۰	۵۰۸/۳	۵۶۹/۲	۲۹	۲۶	۳۲
۴	۱۵/۰	۱۶/۰	۶/۷	۳۰۵/۰	۳۲۵/۳	۱۷	۱۴	۲۰
۵	۱۸/۰	۲۰/۰	۱۱/۱	۳۶۵/۹	۴۰۶/۶	۲۱	۱۸	۲۴
۶	۷/۰	۸/۰	۱۴/۳	۱۴۲/۳	۱۶۲/۶	۸	۵	۱۱
۷	۹/۰	۱۰/۰	۱۱/۱	۱۸۳/۰	۲۰۳/۳	۱۰	۷	۱۴
۸	۱۷/۰	۲۲/۰	۲۹/۴	۳۴۵/۶	۴۴۷/۳	۲۰	۱۷	۲۳
۹	۲۲/۰	۲۴/۰	۹/۱	۴۴۷/۳	۴۸۷/۹	۲۶	۲۲	۲۹
۱۰	۱۵/۰	۱۶/۰	۶/۷	۳۰۵/۰	۳۲۵/۳	۱۷	۱۴	۲۰
۱۱	۱۶/۰	۲۰/۰	۲۵/۰	۳۲۵/۳	۴۰۶/۶	۱۸	۱۵	۲۲
۱۲	۲۱/۰	۲۵/۰	۱۹/۰	۴۲۶/۹	۵۰۸/۳	۲۴	۲۱	۲۷
۱۳	۱۵/۰	۱۶/۰	۶/۷	۳۰۵/۰	۳۲۵/۳	۱۷	۱۴	۲۰
۱۴	۱۴/۰	۱۷/۰	۲۱/۴	۲۸۴/۶	۳۴۵/۶	۱۶	۱۳	۱۹
۱۵	۱۹/۰	۲۲/۰	۱۵/۸	۳۸۶/۳	۴۴۷/۳	۲۲	۱۹	۲۵
۱۶	۱۶/۰	۱۸/۰	۱۲/۵	۳۲۵/۳	۳۶۵/۹	۱۹	۱۶	۲۲
۱۷	۲۰/۰	۲۳/۰	۱۵/۰	۴۰۶/۶	۴۶۷/۶	۲۳	۲۰	۲۶
۱۸	۱۷/۰	۱۹/۰	۱۱/۸	۳۴۵/۶	۳۸۶/۳	۲۰	۱۷	۲۳
۱۹	۱۳/۰	۱۷/۰	۳۰/۸	۲۶۴/۳	۳۴۵/۶	۱۵	۱۲	۱۸
۲۰	۱۹/۰	۲۴/۰	۲۶/۳	۳۸۶/۳	۴۸۷/۹	۲۲	۱۹	۲۵
۲۱	۱۰/۰	۱۱/۰	۱۰/۰	۲۰۳/۳	۲۲۳/۶	۱۱	۸	۱۵
۲۲	۲۶/۰	۳۱/۰	۱۹/۲	۵۲۸/۶	۶۳۰/۲	۳۰	۲۷	۳۳
۲۳	۲۸/۰	۳۲/۰	۱۴/۳	۵۶۹/۲	۶۵۰/۶	۳۳	۲۹	۳۶
۲۴	۱۲/۰	۱۳/۰	۸/۳	۲۴۴/۰	۲۶۴/۳	۱۴	۱۱	۱۷
۲۵	۱۵/۰	۱۶/۰	۶/۷	۳۰۵/۰	۳۲۵/۳	۱۷	۱۴	۲۰
۲۶	۱۴/۰	۱۶/۰	۱۴/۳	۲۸۴/۶	۳۲۵/۳	۱۶	۱۳	۱۹
۲۷	۱۶/۰	۱۸/۰	۱۲/۵	۳۲۵/۳	۳۶۵/۹	۱۸	۱۶	۲۲
۲۸	۲۵/۰	۳۲/۰	۲۸/۰	۵۰۸/۳	۶۵۰/۶	۲۹	۲۶	۳۲
۲۹	۱۳/۰	۱۷/۰	۳۰/۸	۲۶۴/۳	۳۴۵/۶	۱۵	۱۲	۱۸
۳۰	۱۲/۰	۱۳/۰	۸/۳	۲۴۴/۰	۲۶۴/۳	۱۴	۱۱	۱۷
۳۱	۱۹/۰	۲۵/۰	۳۱/۶	۳۸۶/۳	۵۰۸/۳	۲۲	۱۹	۲۵
۳۲	۲۵/۰	۲۷/۰	۸/۰	۵۰۸/۳	۵۴۸/۹	۲۹	۲۶	۳۲
۳۳	۱۵/۰	۱۷/۰	۱۳/۳	۳۰۵/۰	۳۴۵/۶	۱۷	۱۴	۲۰
۳۴	۱۸/۰	۱۹/۰	۵/۶	۳۶۵/۹	۳۸۶/۳	۲۱	۱۸	۲۴
۳۵	۱۶/۰	۱۸/۰	۱۲/۵	۳۲۵/۳	۳۶۵/۹	۱۹	۱۶	۲۲
۳۶	۲۳/۰	۲۷/۰	۱۷/۴	۴۶۷/۶	۵۴۸/۹	۲۷	۲۴	۳۰
میانگین (MPa)	۱۶/۹	۱۹/۶	۱۶/۱	۳۴۳/۴	۳۹۸/۷	۱۹/۵	۱۶/۵	۲۲/۶
انحراف از معیار	۵/۰	۶/۱	۹/۳	۱۰۲/۶	۱۲۳/۱	۶/۰	۵/۹	۵/۹
درصد تغییرات	۲۹/۹	۳۰/۹	۵۷/۸	۲۹/۹	۳۰/۲	۳۰/۶	۳۵/۶	۲۶/۰

PINPB: درصد افزایش تعداد ضربات پس از ترک اولیه گروه A1

جدول ۸: نتایج تست مقاومت ضربه‌ای و مقاومت نهایی پیش‌بینی شده برای گروه A2

شماره نمونه‌ها	نتایج تست مقاومت ضربه‌ای-گروه A2					مقاومت نهایی پیش‌بینی شده		
	FC تعداد ضربات برای مقاومت ترک اول	UR تعداد ضربات برای مقاومت انهدام	PINPB (blows)	انرژی ضربه‌ای (kN.mm)		UR	پیش‌بینی ۹۵ درصد برای تعداد ضربات لازم شکست نمونه‌ها	
				FC	UR		کران پایین پیش‌بینی شده	کران بالای پیش‌بینی شده
۱	۲۹	۳۳	۱۳	۵۸۹	۶۷۰	۳۳	۳۱	۳۶
۲	۲۷	۳۲	۱۸	۵۴۹	۶۵۰	۳۱	۲۹	۳۴
۳	۲۱	۲۵	۱۹	۴۲۷	۵۰۸	۲۵	۲۳	۲۷
۴	۳۰	۳۶	۲۰	۶۱۰	۷۳۱	۳۵	۳۲	۳۷
۵	۱۷	۲۱	۲۴	۳۴۵	۴۲۷	۲۱	۱۸	۲۳
۶	۲۶	۳۰	۱۵	۵۲۸	۶۱۰	۳۰	۲۸	۳۳
۷	۲۸	۳۴	۲۱	۵۶۹	۶۹۱	۳۲	۳۰	۳۵
۸	۲۵	۲۸	۱۲	۵۰۸	۵۶۹	۲۹	۲۷	۳۲
۹	۲۵	۳۱	۲۴	۵۰۸	۶۳۰	۲۹	۲۷	۳۲
۱۰	۳۲	۳۸	۱۹	۶۵۰	۷۷۲	۳۷	۳۴	۳۹
۱۱	۳۳	۳۷	۱۲	۶۷۰	۷۵۲	۳۸	۳۵	۴۰
۱۲	۳۰	۳۵	۱۷	۶۱۰	۷۱۱	۳۵	۳۲	۳۷
۱۳	۲۹	۳۲	۱۰	۵۹۰	۶۵۰	۳۳	۳۱	۳۶
۱۴	۳۱	۳۴	۱۰	۶۳۰	۶۹۱	۳۶	۳۳	۳۸
۱۵	۲۹	۳۴	۱۷	۵۹۰	۶۹۱	۳۳	۳۱	۳۶
۱۶	۲۸	۳۵	۲۵	۵۶۹	۷۱۱	۳۲	۳۰	۳۵
۱۷	۱۶	۲۰	۲۵	۳۲۵	۴۰۶	۲۰	۱۷	۲۲
۱۸	۳۷	۴۲	۱۳	۷۵۲	۸۵۳	۴۲	۴۰	۴۵
۱۹	۲۳	۲۷	۱۷	۴۶۷	۵۴۸	۲۷	۲۵	۲۹
۲۰	۲۰	۲۴	۲۰	۴۰۶	۴۸۸	۲۴	۲۱	۲۶
۲۱	۱۴	۱۶	۱۴	۲۸۴	۳۲۵	۱۸	۱۵	۲۰
۲۲	۲۵	۲۹	۱۶	۵۰۸	۵۹۰	۱۹	۲۷	۳۲
۲۳	۲۲	۲۵	۱۴	۴۴۷	۵۰۸	۲۶	۲۴	۲۸
۲۴	۱۰	۱۴	۴۰	۲۰۳	۲۸۴	۱۳	۱۱	۱۶
۲۵	۱۷	۲۲	۳۰	۳۴۵	۴۴۷	۲۱	۱۸	۲۳
۲۶	۲۶	۳۱	۱۹	۵۲۸	۶۳۰	۳۰	۲۸	۳۳
۲۷	۳۵	۳۸	۹	۷۱۱	۷۷۲	۴۰	۳۷	۴۲
۲۸	۲۱	۲۳	۹	۴۲۶	۴۶۷	۲۵	۲۲	۲۷
۲۹	۱۳	۱۷	۳۱	۲۶۴	۳۴۵	۱۷	۱۴	۱۹
۳۰	۲۸	۳۲	۱۴	۵۶۹	۶۵۰	۳۲	۳۰	۳۵
۳۱	۲۷	۳۱	۱۵	۵۴۸	۶۳۰	۳۱	۲۹	۳۴
۳۲	۱۵	۱۵	۱۵	۲۶۴	۳۰۵	۱۷	۱۴	۱۹
۳۳	۲۰	۱۹	۲۷	۳۰۵	۳۸۶	۱۹	۱۶	۲۱
۳۴	۲۸	۲۲	۱۰	۴۰۶	۴۴۷	۲۴	۲۱	۲۶
۳۵	۱۸	۳۴	۲۱	۵۶۹	۶۹۱	۳۲	۳۰	۳۵
۳۶	۲۱	۲۲	۲۲	۳۶۵	۴۴۷	۲۲	۱۹	۲۴
میانگین (MPa)	۲۴/۱	۲۸/۳	۱۸	۴۹۰	۵۷۵	۲۸	۲۵/۸	۳۰/۷
انحراف از معیار	۶/۸	۷/۳	۶/۸	۱۳۷	۱۴۹	۷/۲	۷/۲	۷/۲
درصد تغییرات	۲۸	۲۵/۹	۳۶/۹	۲۸	۲۵/۹	۲۵/۸	۲۸	۲۳/۶

PINPB: درصد افزایش تعداد ضربات پس از ترک اولیه گروه A1

جدول ۹: نتایج تست مقاومت ضربه‌ای و مقاومت نهایی پیش‌بینی‌شده برای گروه A3

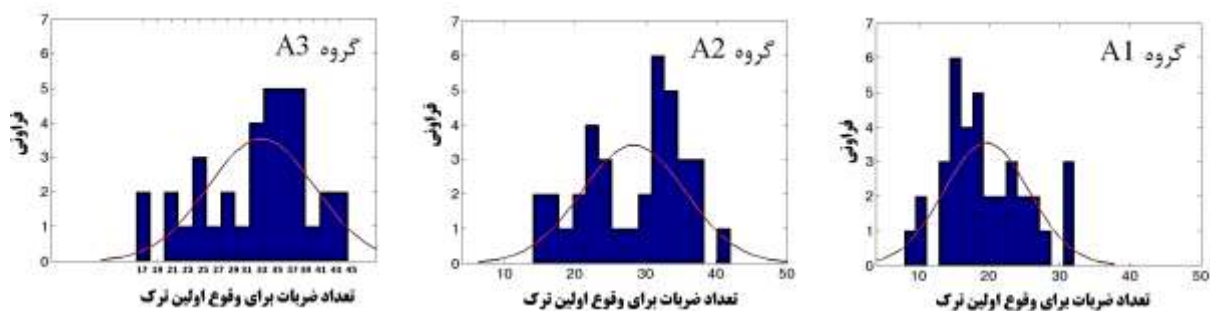
شماره نمونه‌ها	نتایج تست مقاومت ضربه‌ای-گروه A3					مقاومت نهایی پیش‌بینی‌شده		
	FC تعداد ضربات برای مقاومت ترک اول	UR تعداد ضربات برای مقاومت انهدام	PINPB (blows)	انرژی ضربه‌ای (kN.mm)		UR	پیش‌بینی ۹۵ درصد برای تعداد ضربات لازم شکست نمونه‌ها	
				FC	UR		کران پایین پیش‌بینی‌شده	کران بالای پیش‌بینی‌شده
۱	۲۸	۳۹	۳۹/۳	۵۶۹/۲	۷۹۲/۹	۳۲	۲۹	۳۵
۲	۱۲	۱۶	۳۳/۳	۲۴۴/۰	۳۲۵/۳	۱۷	۱۲	۱۹
۳	۲۷	۳۲	۱۸/۵	۵۴۸/۹	۶۵۰/۶	۳۱	۲۸	۳۴
۴	۱۵	۱۸	۲۰/۰	۳۰۵/۰	۳۶۵/۹	۱۹	۱۶	۲۲
۵	۳۱	۳۶	۱۶/۱	۶۳۰/۲	۷۳۱/۹	۳۵	۳۲	۳۸
۶	۳۱	۳۶	۱۶/۱	۶۳۰/۲	۷۳۱/۹	۳۵	۳۲	۳۸
۷	۳۳	۳۷	۱۲/۱	۶۷۰/۹	۷۵۲/۲	۳۷	۳۴	۴۰
۸	۲۶	۲۹	۱۱/۵	۵۲۸/۶	۵۸۹/۶	۳۰	۲۷	۳۳
۹	۳۵	۳۹	۱۱/۴	۷۱۱/۶	۷۹۲/۹	۳۹	۳۶	۴۲
۱۰	۴۲	۴۶	۹/۵	۸۵۳/۹	۹۳۵/۲	۴۶	۴۳	۴۹
۱۱	۳۵	۳۹	۱۱/۴	۷۱۱/۶	۷۹۲/۹	۳۹	۳۶	۴۲
۱۲	۳۹	۴۴	۱۲/۸	۷۹۲/۹	۸۹۴/۵	۴۳	۴۰	۴۶
۱۳	۳۱	۳۵	۱۲/۹	۶۳۰/۲	۷۱۱/۶	۳۵	۳۲	۳۸
۱۴	۳۰	۳۴	۱۳/۳	۶۰۹/۹	۶۹۱/۲	۳۴	۳۱	۳۷
۱۵	۳۱	۳۵	۱۲/۹	۶۳۰/۲	۷۱۱/۶	۳۵	۳۲	۳۸
۱۶	۳۰	۳۴	۱۳/۳	۶۰۹/۹	۶۹۱/۲	۳۴	۳۱	۳۷
۱۷	۴۱	۴۵	۹/۸	۶۳۰/۲	۹۱۴/۹	۴۵	۴۲	۴۸
۱۸	۳۸	۴۲	۱۰/۵	۶۰۹/۹	۸۵۳/۹	۴۲	۳۹	۴۵
۱۹	۳۲	۳۶	۱۲/۵	۸۳۳/۵	۷۳۱/۹	۳۶	۳۳	۳۹
۲۰	۲۴	۲۶	۸/۳	۴۸۷/۹	۵۲۸/۶	۲۸	۲۵	۳۱
۲۱	۱۹	۲۳	۲۱/۱	۳۸۶/۳	۴۶۷/۶	۲۴	۲۰	۲۶
۲۲	۳۴	۳۸	۱۱/۸	۶۹۱/۲	۷۷۲/۵	۳۸	۳۵	۴۱
۲۳	۳۰	۳۴	۱۳/۳	۶۰۹/۹	۶۹۱/۲	۳۴	۳۱	۳۷
۲۴	۱۷	۲۲	۲۹/۴	۳۴۵/۶	۴۴۷/۳	۲۱	۱۸	۲۴
۲۵	۱۸	۲۲	۲۲/۲	۳۶۵/۹	۴۴۷/۳	۲۲	۱۹	۲۵
۲۶	۳۳	۳۷	۱۲/۱	۶۷۰/۹	۷۵۲/۲	۳۷	۳۴	۴۰
۲۷	۲۰	۲۵	۲۵/۰	۴۰۶/۶	۵۰۸/۳	۲۴	۲۱	۲۷
۲۸	۲۳	۲۶	۱۳/۰	۴۶۷/۶	۵۲۸/۶	۲۷	۲۴	۳۰
۲۹	۳۳	۳۸	۱۵/۲	۶۷۰/۹	۷۷۲/۵	۳۷	۳۴	۴۰
۳۰	۳۵	۴۰	۱۴/۳	۷۱۱/۶	۸۱۳/۲	۳۹	۳۶	۴۲
۳۱	۳۵	۴۰	۱۴/۳	۷۱۱/۶	۸۱۳/۲	۳۹	۳۶	۴۲
۳۲	۳۲	۳۷	۱۵/۶	۶۵۰/۶	۷۵۲/۲	۳۶	۳۳	۳۹
۳۳	۲۵	۲۸	۱۲/۰	۵۰۸/۳	۵۶۹/۲	۲۹	۲۶	۳۲
۳۴	۲۷	۳۰	۱۱/۱	۵۴۸/۹	۶۰۹/۹	۳۱	۲۸	۳۴
۳۵	۳۹	۴۳	۱۰/۳	۷۹۲/۹	۸۷۴/۲	۴۳	۴۰	۴۶
۳۶	۲۹	۳۴	۱۷/۲	۵۸۹/۶	۶۹۱/۲	۳۳	۳۰	۳۶
میانگین (MPa)	۲۹/۴	۳۳/۷۵	۱۵/۶۶	۵۹۸/۶	۶۸۶/۱	۳۳/۵	۳۰/۴	۳۶/۴
انحراف از معیار	۷/۳	۷/۵۷	۶/۷۹	۱۴۸/۵	۱۵۳/۶	۷/۲	۷/۴	۷/۳
درصد تغییرات	۲۴/۸	۲۲/۴۳	۴۳/۴۲	۲۴۰/۸۰	۲۲/۴	۲۱/۵	۲۴/۲	۲۰/۰

PINPB: درصد افزایش تعداد ضربات پس از ترک اولیه گروه A1

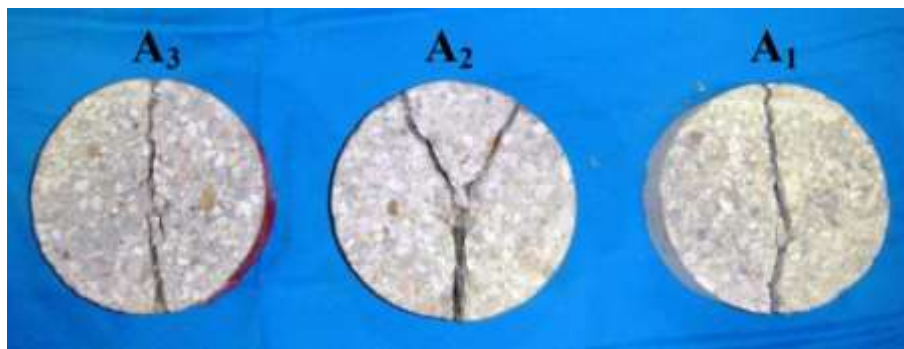
۸-۲- مقاومت انهدام

برای گروه سوم بین ۱۶ تا ۴۶ ضربه می‌باشد. ضریب تغییرات نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌های مربوط به مقاومت نهایی هر سه سری نمونه تقریباً مشابه می‌باشد. ضریب تغییرات برای گروه اول تا سوم به ترتیب ۳۰/۹، ۲۵/۹ و ۲۲/۴۳ می‌باشد. گروه اول دارای بیشترین ضریب تغییرات در بین گروه‌ها می‌باشد. که نشان‌دهنده پراکنده‌تر بودن داده‌ها نسبت به دو گروه دیگر می‌باشد. ضریب تغییرات برای مقاومت انهدام در گروه سوم به ترتیب ۲۷ و ۱۳ درصد کمتر از گروه اول (۰٪ میکروسیلیس) و گروه دوم (۷ درصد میکروسیلیس) می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش درصد میکرو سیلیس پراکندگی داده‌ها کاهش می‌یابد. انحراف از معیار برای گروه‌های اول تا سوم به ترتیب ۶/۱، ۳/۱ و ۳/۰۷ می‌باشد. گروه اول دارای بیشترین انحراف از معیار در بین سه گروه می‌باشد. در شکل ۱۰ نمونه‌ها در پایان آزمایش نشان داده شده‌اند.

در شکل ۹ نمودار هیستوگرام مقاومت انهدام برای هر سه سری بتن به همراه منحنی توزیع نرمال مشاهده می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد هر سه گروه بتنی به‌سختی بر منحنی توزیع نرمال تطابق دارند. مطابق جدول ۷ تا ۹ مقدار میانگین مقاومت انهدام برای سه گروه به ترتیب ۱۹/۶، ۲۳/۳ و ۲۶/۷۲ می‌باشد. مقدار میانگین مقاومت انهدام گروه سوم (دارای ۱۴ درصد میکرو سیلیس) به ترتیب ۱/۴ و ۱/۱۵ برابر مقاومت انهدام نمونه گروه‌های اول و دوم می‌باشد. این افزایش مقاومت انهدام به علت افزایش مقاومت بتن ناشی از اضافه کردن میکرو سیلیس می‌باشد. اضافه کردن میکرو سیلیس به بتن موجب همگن‌تر شدن بتن می‌گردد در نتیجه مقاومت ضربه‌ای آن را افزایش می‌دهد. دامنه تغییرات واقعی ضربات نهایی برای گروه اول بین ۸ تا ۳۲ ضربه و برای گروه دوم بین ۱۴ تا ۴۲ ضربه و



شکل ۹: هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش توزیع نرمال مقاومت اولین ترک سه گروه



شکل ۱۰: مدهای انهدام دیسک‌های نمونه برای همه گروه‌ها

سوم دارای بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده برای مقاومت اولین ترک و مقاومت انهدام می‌باشد. متوسط انرژی جذب‌شده به‌وسیله گروه سوم در مقاومت انهدام، ۱۳۶/۶۸ کیلو نیوتن-میلیمتر می‌باشد که به ترتیب ۲۰ و ۷۲ درصد بیشتر از گروه‌های اول و دوم است. پارامتر PINPB نشان‌دهنده درصد افزایش ضربات بعد از رخ دادن اولین ترک می‌باشد. این پارامتر در جداول ۷ تا ۹ ارائه شده است.

۳-۸- جذب انرژی و مقاومت بعد از ترک اولیه

انرژی حاصل از یک مرتبه افتادن وزنه ۴/۴۵ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر بر روی گوی فولادی به قطر ۶۳۵ میلی‌متر با توجه به روابط فیزیکی (سقوط جسم آزاد) برابر با ۲۰/۳۴۵ میلی‌متر می‌باشد. انرژی جذب‌شده به‌وسیله دیسک بتنی برای مقاومت اولین ضربه و مقاومت انهدام در جدول ۷ تا ۹ نشان داده شده است. مطابق این جداول گروه

باشد. رابطه خطی پیش نهادی برای تعداد ضربات مقاومت انهدام به شکل معادله (۲) می‌باشد.

$$\hat{N}_2 = \alpha + \beta N_1 \quad (2)$$

در این رابطه N_1 تعداد ضربات لازم برای رخ دادن اولین ترک می‌باشد که از آزمایش به دست آمده و همچنین \hat{N}_2 تعداد ضربات پیش‌بینی شده برای مقاومت انهدام می‌باشد. ضریب β در رابطه ۲ از رابطه ۳ به دست می‌آید و همچنین ضریب α نیز از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

$$\beta = \frac{[\sum_{i=1}^n (N_1)_i (N_2)_i] - n \bar{N}_1 \bar{N}_2}{[\sum_{i=1}^n [(N_1)_i]^2] - n (\bar{N}_1)^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \bar{N}_2 - \beta \bar{N}_1 \quad (4)$$

روابط محاسبه شده به روش رگرسیون خطی به شکل معادلات ۵ تا ۷ بیان می‌گردد. در شکل ۱۱ مقادیر داده‌ها به همراه خط رگرسیون نشان داده شده است. مطابق این شکل داده‌ها در اطراف خط پراکنده می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مطابق شکل ۱۱ با افزایش درصد میکرو سیلیس فاصله داده‌ها از خط برازش شده کمتر می‌گردد. همچنین با استفاده از رابطه ۸ و ۹ سطوح بالا (UPB) و پایین (LPB) روابط ۵ تا ۷ با قابلیت اطمینان ۹۵ درصد محاسبه گردید. در روابط زیر t مقدار توزیع تابع استودنت برای سطح ۹۵ درصد اطمینان و SD مقدار انحراف از معیار داده‌ها می‌باشد. مقادیر کرانه بالا و پایین روابط ۵ تا ۷ در جدول ۴ تا ۶ قابل ملاحظه می‌باشد.

$$\hat{N}_2 = -0.37 + 1.1815 N_1 \quad (5)$$

$$\hat{N}_2 = 2.915 + 1.0533 N_1 \quad (6)$$

$$\hat{N}_2 = 5.239 + 0.9715 N_1 \quad (7)$$

$$(UPB)_j = (\hat{N}_2)_j + t \times (SD) \times \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{((N_1)_j - \bar{N}_1)^2}{\sum_{i=1}^n ((N_1)_i - \bar{N}_1)^2}} \quad (8)$$

$$(LPB)_j = (\hat{N}_2)_j - t \times (SD) \times \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{((N_1)_j - \bar{N}_1)^2}{\sum_{i=1}^n ((N_1)_i - \bar{N}_1)^2}} \quad (9)$$

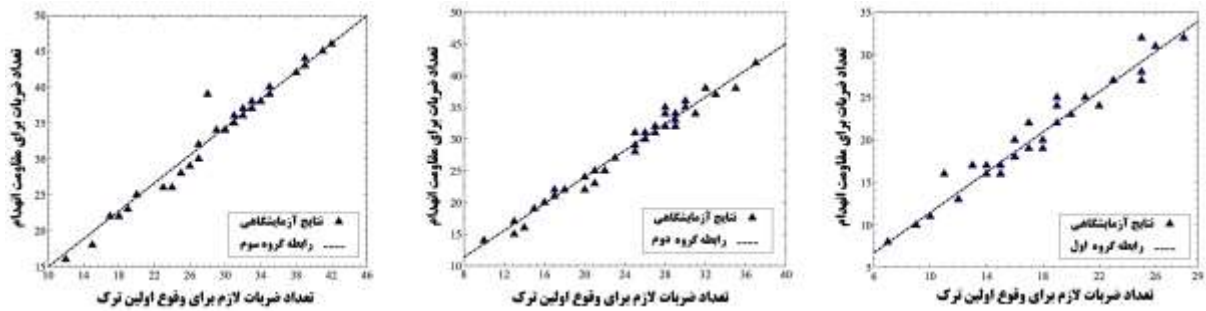
همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد متوسط مقدار پارامتر PINPB برای گروه دوم ۱۸/۳ درصد می‌باشد که به ترتیب ۱۴ و ۱۷ درصد بیشتر از گروه‌های اول و سوم می‌باشد. افزایش مقدار میکروسیلیس تا ۷٪ اثر مثبت در افزایش مقدار PINPB و افزایش بیش از ۷٪ اثر منفی در مقدار PINPB دارد.

۴-۸- پیش‌بینی مقاومت انهدام

در حالت کلی ضریب همبستگی که با R نشان داده شده، بین ۱ تا -۱ می‌باشد و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد. مقادیر مثبت و نزدیک به یک ضریب همبستگی نشان‌دهنده وجود یک رابطه خطی با شیب مثبت بین نتایج می‌باشد. ضریب همبستگی محاسبه شده برای گروه یک تا سه به ترتیب ۰/۹۷۱، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۵ می‌باشد. ضریب همبستگی نزدیک به یک نشان‌دهنده خطی بودن رابطه بین داده‌ها می‌باشد. در بین سه گروه، گروه اول دارای ضریب همبستگی بزرگتری نسبت به دو گروه دیگر می‌باشد. در رابطه ۱، $(N_1)_i$ و $(N_2)_i$ به ترتیب تعداد ضربات لازم برای رخ دادن اولین ترک و انهدام نهایی می‌باشند که از طریق آزمایش به دست می‌آیند. n تعداد نمونه‌های هر سری می‌باشد که برابر ۳۶ نمونه است. \bar{N}_1 و \bar{N}_2 به ترتیب مقادیر متوسط تعداد ضربات لازم برای رخ دادن اولین ترک و ترک نهایی می‌باشند.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(N_1)_i - \bar{N}_1] [(N_2)_i - \bar{N}_2]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(N_1)_i - \bar{N}_1]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [(N_2)_i - \bar{N}_2]^2}} \quad (1)$$

یک رابطه خطی بین مقادیر مقاومت اولیه اولین ترک و مقاومت نهایی به‌طور محسوسی قابل مشاهده می‌باشد. در روش برازش خط مستقیم به روش حداقل مربعات، مجموع مربعات خطاها می‌بایست کمترین مقدار را داشته باشد. در این روش خطا عبارت است از فاصله عمودی بین مقدار واقعی و مقدار محاسبه شده از معادله. برای هر مجموعه‌ای از مشاهدات آماری، خطوط مختلف دارای مجموع مربعات خطای متفاوتی ($\sum e_i^2$) خواهند بود. بهترین خط برازش، خطی می‌باشد که در آن $\sum e_i^2$ دارای کمترین مقدار خود



شکل ۱۱: خط برازش شده در میان داده‌های آزمایشگاهی

جدول در ۹۰ درصد سطح اطمینان تعداد ضربات لازم به‌منظور اینکه مقدار خطا کمتر از ۱۰ درصد باشد برای مقاومت اولین ترک در گروه‌های اول تا سوم به ترتیب ۱۵، ۱۳ و ۱۰ تکرار می‌باشد. همچنین برای مقاومت نهایی برای گروه‌های اول تا سوم در ۹۰٪ سطح اطمینان تعداد تکرارهای لازم برای داشتن خطای زیر ۱۰٪ به ترتیب ۱۷، ۱۱ و ۸ ضربه می‌باشد. در جدول ۱۱ مقدار تعداد آزمایشات لازم برای درصد خطاهای مختلف در ۹۵ درصد سطح اطمینان نشان داده شده است. مطابق این جدول تعداد آزمایشات لازم به‌منظور داشتن خطای زیر ۱۰ درصد برای مقاومت اولین ترک گروه‌های اول تا سوم به ترتیب ۲۲، ۲۵ و ۱۷ و همچنین برای مقاومت نهایی به ترتیب ۲۷، ۱۹ و ۱۵ می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش درصد میکرو سیلیس تعداد آزمایشات لازم در هر سطح از خطا، کاهش می‌یابد.

۵-۸- تعداد تکرارهای هر آزمایش

از ضریب تغییرات ارائه شده در جداول ۷ تا ۹، می‌تواند به‌منظور محاسبه حداقل تعداد ضربات لازم (n) به نحوی که خطای به وجود آمده (e) کمتر از یک حد مشخص باشد، استفاده نمود. این تعداد ضربات لازم را می‌توان با استفاده از رابطه معادله ۱۰ محاسبه نمود [۲۸].

$$n = \frac{[COV]^2 t^2}{e^2} \quad (10)$$

در این رابطه COV، ضریب تغییرات و t، مقدار توزیع تابع استودنت برای یک سطح مشخص اطمینان می‌باشد. مقدار تابع t استودنت فقط به مقدار سطح اطمینان وابسته نمی‌باشد بلکه به درجه آزادی (مربوط به تعداد آزمایشات) نیز وابسته است. برای درجات آزادی بالاتر از ۱۲۰، مقادیر تابع t استودنت برای ۹۵ و ۹۰ درصد سطح اطمینان به ترتیب به مقادیر ۱/۶۴۵ و ۱/۲۸۲ میل می‌کند. در جدول ۱۰ مقدار حداقل تعداد تکرار برای درصد مختلف خطا در ۹۰ درصد سطح اطمینان نشان داده شده است. مطابق این

جدول ۱۰: تعداد تکرارهای موردنیاز برای نگه داشتن خطا در محدوده ۹۰ درصد سطح اطمینان

خطا (%) (e)	۹۰ درصد سطح اطمینان					
	گروه A1		گروه A2		گروه A3	
	FC	UR	FC	UR	FC	UR
<۱۰	۱۵	۱۷	۱۳	۱۱	۱۰	۸
<۱۵	۷	۸	۶	۵	۵	۴
<۲۰	۴	۴	۳	۳	۳	۲
<۲۵	۳	۳	۲	۲	۲	۱
<۳۰	۲	۲	۱	۱	۱	۱
<۳۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱
<۴۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
<۵۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۱۱: تعداد تکرارهای موردنیاز برای نگه داشتن خطا در محدوده ۹۵ درصد سطح اطمینان

خطا (%e)	۹۵ درصد سطح اطمینان					
	گروه A1		گروه A2		گروه A1	
	FC	UR	FC	UR	FC	UR
<۱۰	۲۵	۲۷	۲۲	۱۹	۱۷	۱۵
<۱۵	۱۱	۱۲	۱۰	۸	۸	۶
<۲۰	۶	۷	۶	۵	۴	۴
<۲۵	۴	۴	۴	۳	۳	۲
<۳۰	۳	۳	۳	۲	۲	۲
<۳۵	۲	۲	۲	۱	۱	۱
<۴۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
<۵۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱

۹- نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرات میکرو سیلیس بر روی مقاومت فشاری و مقاومت ضربه‌ای بتن به صورت آزمایشگاهی و آماری بررسی گردید.

- مطابق نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی، مشخص گردید که با افزودن میکرو سیلیس، ضریب تغییرات نمونه‌ها کاهش می‌یابد. ضریب تغییرات گروه سوم به ترتیب ۳۵ و ۳ درصد کمتر از گروه‌های اول و دوم می‌باشد. همچنین مقدار متوسط مقاومت فشاری با افزایش میکرو سیلیس، افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری گروه سوم به ترتیب ۲۳ و ۱۶ درصد بیش از گروه‌های اول و دوم می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در همه گروه‌ها تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشد.

- مقاومت‌های ضربه‌ای به دست آمده از آزمایش وزنه افتان برای بتن‌های دارای ۷ و ۱۴ درصد میکرو سیلیس و بتن بدون میکرو سیلیس، دارای مقادیر انحراف از معیار بزرگتری نسبت به نمونه‌های مقاومت فشاری بودند.

- با افزایش درصد میکرو سیلیس در نمونه‌ها پراکندگی بین داده‌ها کاهش می‌یابد. مقادیر ضریب تغییرات که معیاری برای پراکندگی داده‌ها می‌باشد، در گروه سوم (۱۴ درصد میکرو سیلیس) بیش از دو گروه دیگر می‌باشد. ضریب تغییرات در گروه سوم برای مقاومت اولین ضربه ۲۴/۸ درصد می‌باشد که به ترتیب ۱۷ و ۱۱ درصد کمتر از گروه‌های اول و دوم می‌باشد. همچنین ضریب تغییرات برای مقاومت انهدام در گروه سوم ۲۲/۴۳ می‌باشد که به ترتیب ۲۷ و ۱۳ درصد کمتر از گروه اول (صفر درصد

میکرو سیلیس) و گروه دوم (۷ درصد میکرو سیلیس) می‌باشد.

- با افزودن میکرو سیلیس، مقدار متوسط انرژی جذب شده به وسیله نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد به طوری که انرژی جذب شده به وسیله گروه سوم (۱۴ درصد میکرو سیلیس) به ترتیب ۷۲ و ۱۹ درصد بیش از متوسط انرژی جذب شده به وسیله گروه‌های اول و دوم می‌باشد. مطابق آزمایشات انجام گرفته بر روی دیسک‌های بتنی با افزایش مقدار میکرو سیلیس تعداد تست‌های لازم به منظور اینکه سطح خطا از یک مقدار مشخص کمتر باشد، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزودن میکرو سیلیس موجب می‌گردد تا دقت انجام آزمایشات بیشتر گردد.

- نتایج به دست آمده از آزمایش ۶۰ نمونه تیر کوچک، نشان داد که مقاومت خمشی بتن با افزایش درصد میکرو سیلیس افزایش می‌یابد. حداکثر مقاومت خمشی میانگین مربوط به گروه سوم (با ۱۴٪ میکرو سیلیس) می‌باشد که به ترتیب ۱۸ و ۴ درصد بیشتر از مقاومت خمشی نمونه‌های با صفر و ۷ درصد میکرو سیلیس می‌باشد. همچنین آزمایش مقاومت کششی انجام شده نشان داد که توزیع نتایج مربوط به مقاومت کششی، به صورت نرمال می‌باشد. ضریب تغییرات به عنوان شاخص پراکندگی داده‌های مقاومت کششی، برای گروه سوم ۷/۹۹ درصد می‌باشد که به ترتیب ۵/۱ و ۲/۷ درصد از گروه‌های اول و دوم کمتر می‌باشد.

مراجع

- [1] Wild S, Sabir BB, Khatib JM. Factors influencing strength development of concrete

- shrinkage of plain and silica fume cement concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, pp.642–647, **2006**.
- [15] Babu KG, Babu DS. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No. 5, pp.755–762, **2003**.
- [16] Behnood A, Ziari H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, No. 2, pp. 106–112, **2008**.
- [17] Bentur A, Goldman A, Cohen MD. Contribution of transition zone to the strength of high quality silica fume concretes. In: *Proceedings of the materials research society symposium*, vol. 114; pp. 97–103, **1987**.
- [18] P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. Sheu, Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 393–399, **2005**.
- [19] Kishi N, Konno H, Ikeda K, Matsuoka KG. Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rocksheds. *Int J Impact Eng*, Vol. 27, No. 9, pp.969–985, **2002**.
- [20] Ong KCG, Basheer Khan M, Paramasivam P. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact. *Cement Concr Compos*, Vol. 21, No. 5, pp.391–401, **1999**.
- [21] Mindess S, Cheng Y. Perforation of plain and fibre reinforced concretes subjected to low-velocity impact loading. *Cement Concr Res*, Vol. 23, No.1, pp.83–92, **1993**.
- [22] Barr B, Baghli A. A repeated drop-weight impact testing apparatus for concrete. *Mag Concr Res*, Vol.40, No.144, pp. 167–176, **1988**.
- [23] ACI Committee 544, Measurement of properties of fiber reinforced concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 85, No. 6, pp. 583–593, **1988**.
- [24] Day KW. *Concrete mix design, quality control and specification*, 2nd Edition. London: E&FN Spon; **1999**.
- [25] R.N. Swamy, H. Stavrides, *Cem Concr Res*, Vol. 6, pp. 201–216, **1976**.
- [26] Atef Badr, Ashraf F. Ashourb, Andrew K. Plattena, Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete, *Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp.1907–1920, **2006**.
- [27] S. Diamond, S. Sahu, *Densified silica fume: particle sizes and dispersion in concrete*, *Mater. Struct*, Vol 39, No. 9, pp. 849–859, **2006**.
- [28] Zengqi Zhang, Bo Zhang, Peiyu Yan: Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.105, pp. 82–93, **2016**.
- containing silica fume. *Cement Concrete Res*, Vol 25, No. 7, pp. 1567–15., **1995**.
- [2] KÖksal F, Altun F, Yig'it I, S_ahin Y. Combined effect of silica fume and steel fibre on the mechanical properties of high strength concretes. *J Constr Build Mater*; Vol. 22, pp.1874–1880, **2008**.
- [3] Eren Ö, Çelik T. Effects of silica fume and steel fibres on some properties of high strength concrete. *J Constr Build Mater*, Vol. 11, pp.373–382., **1997**.
- [4] Bhanja S, Sengupta B. Influence of silica fumes on the tensile strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No.4, pp.743–747, **2005**.
- [5] Kılıc, A, Atis, CD, Teymen A, Karahan O, Özcan F, Bilim C, et al. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, No. 4, pp.290–296, **2008**.
- [6] Dotto JMR, Abreu AGD, Molin DCCD, Müller IL. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp.31–39, **2004**.
- [7] Almusallam Abdullah A, Beshr Hamoud, Mohammed Maslehuddin, Al-Amoudi Omar SB. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete. *Cem Concr Comp*, Vol.26, pp.891–900, **2004**.
- [8] Khan MI, Lynsdale CJ. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No.1, pp.123–131, **2002**.
- [9] Ha-Won Song, Seung-Woo Pack, Sang-Hyeok Nam, Jong-Chul Jang, Velu Saraswathy. Estimation of the permeability of silica fumes cement concrete. *Journal of Construction and Building Materials*, No. 24, pp 315–321, **2010**.
- [10] Erhan Guneyisi, Mehmet Gesog'lu, Seda Karaog'lu, Kasım Mermerdas Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Journal of Construction and Building Materials*, No. 34, pp 120–130, **2012**.
- [11] ACI Committee 234. Guide for the use of silica fume in concrete (ACI 234R). *ACI Materials Journal*, Vol.92, No.4, pp.437–440, **1995**.
- [12] Almusallam AA, Beshr H, Maslehuddin M, Al-Amoudi OSB. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, No.7, pp.891–900, **2004**.
- [13] Al-Amoudi OSB, Maslehuddin M, Abiola TO. Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage of concrete exposed to hot weather. *Construction and Building Materials*, No.18, pp.737–743, **2004**.
- [14] Al-Amoudi OSB, Abiola TO, Maslehuddin M. Effect of superplasticizer type on plastic