

یادداشت تحقیقاتی

بررسی آزمایشگاهی با رویکرد آماری مقاومت ضربه‌ای بتن‌های توانمند کامپوزیتی

احمد دالوند^{۱*}، فریدون امیدینسب^۲، ایمان بهرامی چگنی^۳

۱- استادیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه لرستان

۲- استادیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه لرستان

۳- مربی گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه لرستان

dalvand.a@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۵/۱۰/۱۸

تاریخ دریافت ۹۵/۰۸/۲۱

چکیده

در این پژوهش، یک مطالعه آزمایشگاهی با رویکرد آماری، روی مقاومت فشاری و خمشی و مقاومت ضربه‌ای بتن‌های توانمند انجام شده است. روی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها آنالیز آماری صورت گرفت. سه سری بتن که به ترتیب دارای ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن بودند، ساخته شد. در مجموع ۲۴۰ نمونه بتنی در سه گروه ساخته شد. از هر طرح اختلاط، ۲۰ نمونه مکعبی ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر، ۲۰ نمونه تیر کوچک به ابعاد ۳۲۰ در ۸۰ در ۶۰ میلی‌متر، ۴۰ نمونه دیسک کوچک به ارتفاع ۶۴ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. از نمونه‌های مکعبی به منظور تعیین مقاومت فشاری، از تیرهای کوچک به منظور تعیین مقاومت خمشی و از دیسک‌های کوچک برای تعیین مقاومت ضربه‌ای استفاده شد. آزمایش ضربه با استفاده از روش وزنه افتان که به وسیله آیین‌نامه ACI 544 پیشنهاد شده، انجام گرفت. آنالیز آماری صورت گرفته نشان داد، داده‌های مربوط به ویژگی‌های مکانیکی دارای پراکندگی کمتری نسبت به داده‌های مربوط به مقاومت ضربه‌ای است. همچنین پراکندگی بین داده‌ها با افزایش درصد الیاف، افزایش یافت.

واژگان کلیدی: مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مقاومت ضربه‌ای، تحلیل آماری.

۱- مقدمه

بارگذاری‌های کششی است. تفاوت رفتار کششی میان بتن‌های معمولی، بتن‌های الیافی و بتن‌های توانمند در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) می‌بینیم، بتن معمولی دارای رفتاری بسیار تردی، است. این تردی بتن معمولی با اضافه نمودن الیاف به آن در بتن الیافی کاهش می‌یابد. همچنین مانند این شکل تفاوت رفتاری بتن‌های

بتن‌های توانمند الیافی کامپوزیتی^۱ (HPFRCC) گونه جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی هستند که با استفاده از مصالح ریز دانه و الیاف ساخته می‌شوند. این نوع از کامپوزیت‌ها دارای رفتار سخت‌شدگی کرنشی تحت

1 High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC)

شناخته نمی‌شوند. آیین‌نامه ACI 544 [17] یک آزمایش وزنه افتان^۳ را برای ارزیابی مقاومت ضربه‌ای بتن‌های الیافی پیشنهاد داده است. این آزمایش به دلیل سادگی و ارزان بودن بسیار استفاده می‌شود. داده‌های به دست آمده از این آزمایش غالباً دارای پراکندگی زیادی است. بیشتر داده‌های به دست آمده از این آزمایش دارای ضریب تغییرات بزرگتر از ۲۵٪ است. بیشتر داده‌های آماری موجود حاصل از آزمایش وزنه افتان، در خصوص بتن‌های الیافی است [18-22]. داده‌های آماری در خصوص آزمایش وزنه افتان کامپوزیت‌های HPFRCC موجود نیست. از این‌رو بررسی آماری رفتار ضربه‌ای و جذب انرژی این نوع کامپوزیت ضروری به نظر می‌رسد.

شکل ۱. مقایسه رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و بتن توانمند

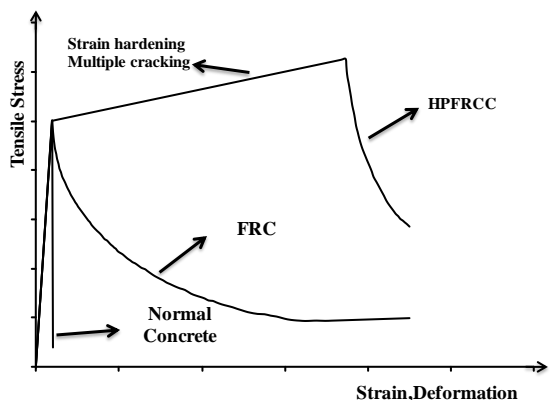


Fig. 1. Comparison of tensile behavior of normal concrete, fiber reinforced concrete and high performance concrete

۲- ضرورت انجام تحقیق

در خصوص علت و اهمیت داده‌ها و نتایج حاصل از این مقاله، قابل گفتن است که بحث قابلیت اطمینان به گونه‌ای، در بیشتر علوم مهندسی مورد توجه است. تدریس دروسی با محتوای آماری و در راستای مبانی تئوری قابلیت اطمینان در برخی از رشته‌های مهندسی جزء دروس اولویت دار است. در خصوص این مباحث در مهندسی سازه، کارهای زیادی در مقایسه با سایر بخش‌ها انجام نشده است. به عنوان نمونه در

توانمند با بتن‌های الیافی در رفتار بعد از اولین ترک، قابل ملاحظه است. پژوهش‌های زیادی در خصوص بتن‌های توانمند کامپوزیتی انجام گرفت که آغاز آن را می‌توان به وسیله اوستون و همکاران در سال ۱۹۷۱ دانست [1]. در سال ۱۹۸۹، کرنچل و استانگ با کاربرد نوعی از الیاف بهم پیوسته به شکل پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند [2]. در سال ۱۹۹۹، کوریچ و جسی و در سال ۲۰۰۳ نیز رینهارت و همکاران نوع جدیدی از بتن الیافی تحت عنوان TRC^۱ را ارائه نمودند که در آن از الیاف به هم بافته شده، استفاده شد [3, 4] آلن و همکاران در سال ۱۹۷۱ کاربرد الیاف به صورت غیر پیوسته و به شکل ورق‌های سیمانی با درصد الیاف بین ۴ تا ۲۰٪ را ارائه نمود [5]. همچنین با مطالعات بیشتر گونه‌ای جدید از مصالح کامپوزیتی توانمند با نام دوکتال در سال ۱۹۸۱ ارائه شد [6]. نمان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ مصالحی را معرفی نمودند که دارای سخت‌شدگی کرنشی در کشش بودند که در رده مصالح HPFRCC طبقه‌بندی شد [7]. همچنین مطالعاتی توسط چانویلارد و ریگاد در سال ۲۰۰۳ روی این مصالح، مقاومت کششی ۱۲ مگاپاسکال را نتیجه داده است [8]. کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی^۲ (ECC) نیز نمونه‌ای جدید از کامپوزیت‌های مهندسی است که به دلیل تشکیل ترک‌های چندگانه، دارای شکل پذیری بالایی هستند [9, 10]. ECC خود تراکم در سال ۲۰۰۷ طراحی شد [11, 12].

مطالعات صورت گرفته روی بتن‌های کامپوزیتی توانمند بیشتر در خصوص ویژگی‌های مکانیکی این کامپوزیت‌ها است. مطالعات بسیار محدودی روی پارامترهای آماری، مانند مقاومت فشاری و خمشی صورت گرفته است. همچنین داده‌های آماری بسیار کمی روی مقاومت ضربه‌ای و جذب انرژی این کامپوزیت‌ها وجود دارد. چندین روش آزمایش به منظور تعیین مقاومت ضربه‌ای و شکنندگی بتن و مصالح مشابه وجود دارد [13-16]. اما هیچکدام از این آزمایش‌ها به دلیل کمبود داده‌های آماری، به عنوان یک آزمایش استاندارد

1 Textile Reinforced Concrete

2 Engineered Cementitious Composite

3 Drop-weight test

دارای ۰/۷۵ درصد الیاف (HP-0.75) و سری سوم دارای ۱ درصد الیاف، (HP-1) نامگذاری شد. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های بتنی با سن ۲۸ روزه است. در این کار آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II (ASTM Type II) تولید شده توسط کارخانه سیمان شاهرود استفاده شد. در این مقاله از مصالح ریزدانه استفاده شد. مصالح استفاده شده در این آزمایش در محدوده‌ی زیر الک نمره‌ی ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) قرار دارد. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مطابق با ASTM C39 انجام شد. همچنین آزمایش مقاومت خمشی روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۳۲۰×۸۰×۶۰ میلی‌متر مطابق با ASTM C78 انجام شد. مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها مطابق روش پیشنهاد شده در کمیته ACI 544 تعیین شد. به این منظور برای هر طرح اختلاط بتن، ۱۰ نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد ۱۵۰×۳۰×۳۰ میلی‌متر ساخته شد و هر نمونه استوانه‌ای به وسیله تیغه‌های الماس به چهار دیسک به طول ۶۴ میلی‌متر تقسیم شد. دیسک‌های بتنی بریده شده از نمونه استوانه‌ای درون دستگاه قرار داده شدند و یک چکش به وزن ۴/۴۵Kg به طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر روی یک توپ فولادی به قطر ۶۳/۵ میلی‌متر رها شد. تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل رویت و انهدام نهایی دیسک بتنی شد، ثبت و در هر آزمایش تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل رویت شد به عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن انهدام نهایی نمونه شد به عنوان مقاومت انهدام در نظر گرفته می‌شود.

۴- طرح اختلاط

در این کار آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II (ASTM Type II) استفاده شد. الیاف استفاده شده در این پژوهش از نوع پلی پروپیلن است. در جدول (۱) ویژگی‌های مکانیکی الیاف PP با چگالی ۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود قطر الیاف به کار برده شده ۰/۱۸ میلی‌متر و طول آنها ۱۲ میلی‌متر است. همچنین درصد مصالح استفاده شده برای

خصوص کاربرد الیاف FRP در سازه و در مقاوم سازی کارهای بسیار زیادی صورت گرفته است. اما در خصوص بحث قابلیت اطمینان در مواردی مانند، ویژگی‌های مکانیکی مواد کامپوزیتی مانند بتن، مطالعات صورت گرفته، بسیار کم است [23]. در بیشتر کارهای آزمایشگاهی برای انجام تست ویژگی‌های مکانیکی، مانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها، از سه نمونه استفاده می‌شود. به عبارت دیگر برای به دست آوردن مقاومت فشاری یک طرح اختلاط مشخص، از مقاومت فشاری سه عدد نمونه تست فشاری، میانگین گیری می‌شود [24]. این در حالی است که مطابق با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های آماری که روی تاثیر، کاربرد الیاف مختلف بر ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های الیافی صورت گرفته است، کاربرد سه عدد نمونه برای هر طرح اختلاط و میانگین‌گیری از نتایج آن برای برخی از انواع بتن‌ها و به خصوص بتن‌های الیافی کافی نیست. نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که، به منظور حصول نتایج در سطح اطمینان بالاتر از ۹۵ درصد (به عنوان نمونه برای برخی از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی) تا ۲۰ نمونه مقاومت فشاری (از هر طرح اختلاط) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است [25-26]. همچنین قابل گفتن است که با توجه به پراکندگی داده‌های آماری در بحث مقاومت ضربه‌ای، در برخی از موارد نیاز است تا برای حصول قابلیت اطمینان قابل قبول برای داده‌ها، تا حدود ۴۰ نمونه دیسک مورد آزمایش ضربه قرار گیرد. بر همین اساس انجام مطالعات آماری روی بتن‌های توانمند به منظور تعیین پارامترهای آماری آن ضروری است.

۳- رویه انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش ۳ سری نمونه بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ ساخته شد. نمونه‌های ساخته شده به ترتیب دارای ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن^۱ بودند. سه سری نمونه‌های بتنی، بر حسب درصد الیاف نامگذاری شدند. سری اول دارای ۰/۵ درصد الیاف (HP-0.5)، سری دوم

1 Polypropylene

ساخت نمونه‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی الیاف

Length(mm)	Diameter(mm)	Color	Tensile strength (MPa)	Density(Kg/m ³)
12	0.018	white	800	910

Table 1. physical properties of fibers

جدول ۲. طرح اختلاط نمونه‌ها

Label	($\frac{\text{Water}}{\text{Cement}}$)	Cement ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	PP Fibers (%)	Fine agg ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	SP ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
HP-0.5	0.38	980	0.5	980	3
HP-0.75	0.38	980	0.75	980	3
HP-1.00	0.38	980	1	980	3

Table 2. Mix proportions of the concrete mixtures

۵- چگونگی قالب‌گیری نمونه‌ها

با افزایش درصد الیاف مقاومت متوسط فشاری نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۳) هیستوگرام مربوط به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۶۰ نمونه مربوط به سه طرح اختلاط نشان داده شده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که نتایج هر سه سری بتن تقریباً دارای توزیع نرمال^۱ است و به خوبی بر منحنی توزیع نرمال هماهنگ است. نمونه‌های گروه HP-1 در بین گروه‌های دیگر دارای میانگین مقاومت فشاری بالاتری است. گروه HP-1 دارای بیشترین انحراف از معیار است به طوری که انحراف از معیار این گروه به ترتیب ۱۰۴ و ۳۶٪ بیشتر از گروه HP-0.5 و HP-0.75 است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد الیاف، پراکندگی داده‌های آماری مربوط به مقاومت فشاری بیشتر می‌شود. مقادیر ضریب تغییرات به دست آمده برای سه سری نمونه از بیشینه مقدار ۱۵٪ که به وسیله سوامی و همکاران [27] پیشنهاد شده کمتر است. علاوه بر آن دی و همکاران [28] پیشنهاد می‌دهند که یک ضریب تغییرات کوچکتر از ۱۰ درصد نشان دهنده یک کنترل کیفیت مناسب است.

بتن آماده شده درون قالب‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر، استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و همچنین قالب‌های منشوری ۶۰×۸۰×۳۲۰ میلی‌متر به ترتیب برای انجام آزمایش تست مقاومت فشاری، تست ضربه‌ای و تست خمشی ریخته شدند. پس از گذشت ۲۸ روز از بتن‌ریزی، نمونه‌ها آزمایش شدند.

۶- تجزیه و تحلیل نتایج

۶-۱- مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی بر طبق ASTM C39 انجام شد. آزمایش با استفاده از یک ماشین تست دیجیتال استاندارد به ظرفیت ۲۰۰۰kN انجام شد. نمونه‌ها و دستگاه تست در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

شکل ۲. نمونه‌های مکعبی و دستگاه تست مقاومت فشاری



Fig. 2. Concrete specimens and test machine

نتایج آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد،

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

Specimen No.	Compressive Strength (MPa)		
	HP-0.5	HP-0.75	HP-1
1	48.88	53.83	53.99
2	49.09	54.03	57.65
3	46.75	51	53.63
4	45.7	51.94	55.13
5	45.03	51.64	52.99
6	47.81	45.98	64.7
7	45.41	55.01	51.44
8	47.21	47.2	49.14
9	47.81	51.2	45.58
10	45.75	47.74	61.02
11	43.46	50.29	61.9
12	45.83	48.64	52.88
13	48.15	49.37	58.15
14	45.42	46.34	54.34
15	41.52	53.42	48.98
16	46.14	56.35	57.89
17	43.36	42.5	54.81
18	43.15	48.66	55.47
19	51.02	48.06	57.52
20	45.45	49.88	59.72
Mean(MPa)	46.14	50.15	55.34
SD(MPa)	2.28	3.42	4.66
CoV(%)	4.96	6.83	8.42

Table 3. Compressive strength test results

¹ normally distributed

مقاومت خمشی همه نمونه نشان داده شده است. همان طوری که ملاحظه می شود با افزایش درصد الیاف، ضریب تغییرات نیز افزایش می یابد. افزایش ضریب تغییرات با افزودن الیاف نشان می دهد که استفاده از الیاف موجب پراکنده تر شدن داده ها می شود. همچنین افزایش درصد الیاف موجب افزایش مقاومت خمشی نیز می شود.

شکل ۴. نمونه آزمایش شده و دستگاه تست خمشی



Fig. 4. Flexural test machine and specimens

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

Specimen No.	Modulus of rupture (MPa)		
	HP-0.5	HP-0.75	HP-1
1	4.70	5.27	6.11
2	4.80	5.13	6.88
3	5.64	5.60	5.89
4	4.35	5.02	6.58
5	4.41	5.11	5.74
6	5.21	4.71	6.39
7	4.67	4.31	6.84
8	4.27	5.51	6.20
9	5.38	5.59	5.74
10	3.88	4.94	6.78
11	4.86	4.56	6.20
12	5.29	4.32	7.14
13	5.11	5.83	6.53
14	4.69	5.32	4.85
15	5.11	5.37	6.27
16	4.99	5.02	6.43
17	5.04	6.11	6.11
18	5.23	4.82	7.31
19	4.59	5.22	5.48
20	4.49	5.00	5.35
Mean(MPa)	4.83	5.14	6.24
SD(MPa)	0.43	0.46	0.61
CoV(%)	8.94	9.08	9.88

Table 4. flexural strength for three groups

شکل ۳. هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش توزیع نرمال مقاومت

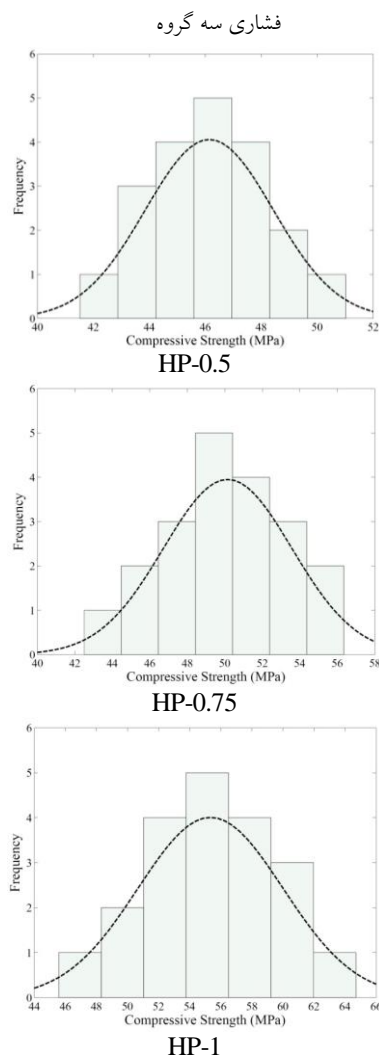


Fig. 3. Distribution of compressive strength test results

۶-۲- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی از طریق آزمایش خمشی یک تیر به ابعاد $۳۲۰ \times ۸۰ \times ۶۰$ میلی متر محاسبه شد. نمای کلی دستگاه تست خمشی و ابعاد نمونه ها در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی روی ۶۰ نمونه برای سه گروه در جدول (۴) ارائه شده است. مطابق این جدول گروه سوم دارای بیشترین مقدار متوسط در بین دو گروه دیگر است. مقاومت خمشی میانگین مربوط به گروه HP-1 به ترتیب ۲۹ و ۲۱ درصد بیشتر از مقاومت خمشی نمونه های گروه HP-0.5 و HP-0.75 است. انحراف از معیار HP-1 به ترتیب ۴۲ و ۳۳ درصد بیشتر از گروه های HP-0.5 و HP-0.75 است. در شکل (۵) نمودار هیستوگرام مربوط به

۳-۶- مقاومت ضربه‌ای

نتایج آزمایش وزنه افتان روی ۱۲۰ دیسک در سه گروه ۴۰ تایی که هرگروه مربوط به یک طرح اختلاط است، در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۶) دستگاه تست ضربه به همراه نمونه‌ها قبل از تست ضربه نشان داده شده است.

شکل ۷. هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش توزیع نرمال مقاومت اولین

ترک سه گروه

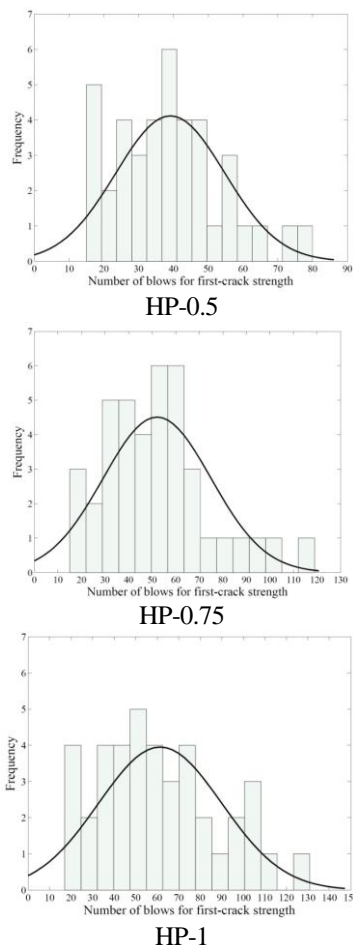


Fig. 7. Frequency histogram and fitted normal curve of the first-crack strength distribution for all groups

۱-۳-۶- مقاومت اولین ترک

در شکل (۷) نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک ۱ برای هر سه سری بتن به همراه منحنی توزیع نرمال مشاهده می‌شود. متوسط مقاومت اولین ترک در HP-1، به ترتیب ۵۷ و ۱۸٪ بیشتر از گروه‌های HP-0.75 و HP-0.5 است. با افزودن الیاف مقادیر انحراف از معیار افزایش می‌یابد. انحراف

1 first-crack strength

شکل ۵. هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش توزیع نرمال مقاومت خمشی سه

گروه

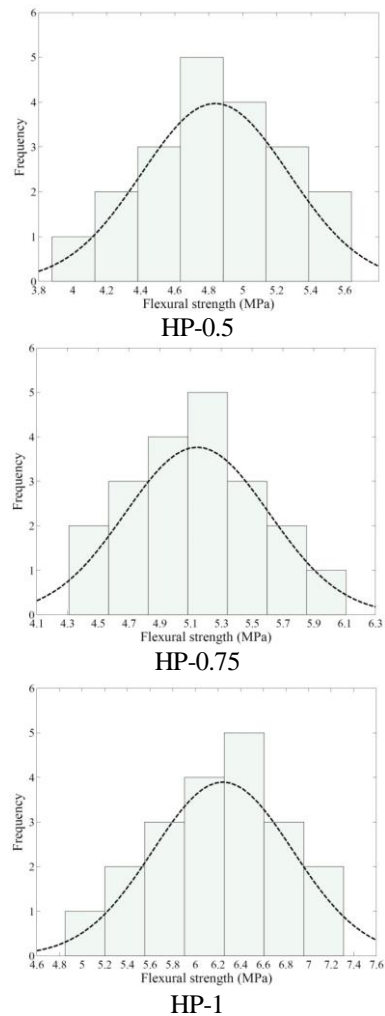


Fig. 5. Frequency histogram and fitted normal curve of the flexural strength of all groups

شکل ۶. دستگاه تست ضربه و نمونه‌ها



Fig 6. Impact apparatus and Disc specimens

مقاومت انهدام گروه HP-1 به ترتیب ۶۶ و ۱۹٪ بیشتر از مقاومت انهدام نمونه گروه‌های HP-0.5 و HP-0.75 است. گروه HP-1 دارای بیشترین مقدار انحراف از معیار است که به ترتیب ۷۶ و ۲۱٪ بیشتر از گروه‌های HP-0.5 و HP-0.75 است. دامنه تغییرات مقاومت انهدام برای گروه HP-0.5 بین ۱۶ تا ۱۰۵ ضربه و برای گروه HP-0.75 بین ۱۸ تا ۱۳۹ ضربه و برای گروه HP-1 بین ۲۵ تا ۱۶۷ ضربه است. گروه HP-1 دارای بیشترین ضریب تغییرات در بین گروه‌ها است که نشان دهنده پراکنده‌تر بودن داده‌ها نسبت به دو گروه دیگر است. ضریب تغییرات برای مقاومت انهدام در گروه HP-1 به ترتیب ۷ و ۲٪ بیشتر از گروه HP-0.5 و HP-0.75 است. اضافه کردن الیاف به مخلوط موجب افزایش مقاومت انهدام و همچنین افزایش پراکندگی بین داده‌ها مربوط به مقاومت انهدام می‌شود. در شکل (۹) چگونگی انهدام مربوط به سه گروه نشان داده شده است.

شکل ۹. مدهای انهدام دیسک‌های نمونه برای همه گروه‌ها

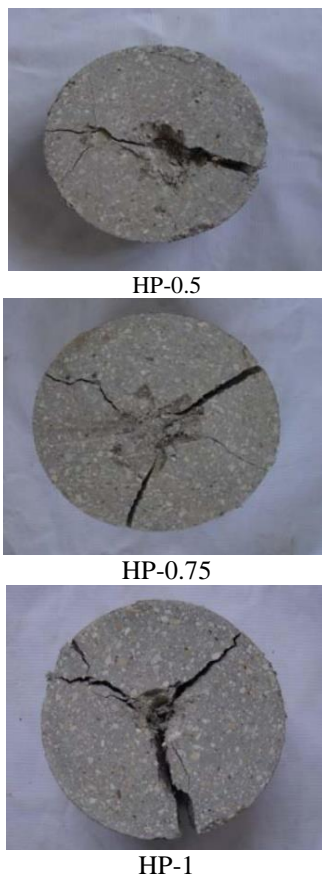


Fig. 9. Failure mode of disc specimens for all groups

از معیار برای مقاومت انهدام گروه HP-1، بیشتر از سایر گروه‌ها است. مقادیر ضریب تغییرات معیار تقریباً مناسبی برای نشان دادن پراکندگی بین داده‌های آماری است. همان‌گونه که از مقادیر ضریب تغییرات برای مقاومت اولین ترک مشخص است، با افزودن الیاف پراکندگی داده‌ها افزایش می‌یابد. ضریب تغییرات برای مقاومت اولین ترک گروه HP-1 به ترتیب ۱۶ و ۶ درصد بیشتر از گروه‌های HP-0.5 و HP-0.75 است.

۳-۳-۶- مقاومت نهایی

در شکل (۸) نمودار هیستوگرام مقاومت انهدام برای هر سه سری بتن به همراه منحنی توزیع نرمال مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود هر سه گروه بتنی به سختی بر منحنی توزیع نرمال هماهنگی دارند.

شکل ۸. هیستوگرام فراوانی و منحنی برازش توزیع نرمال مقاومت نهایی

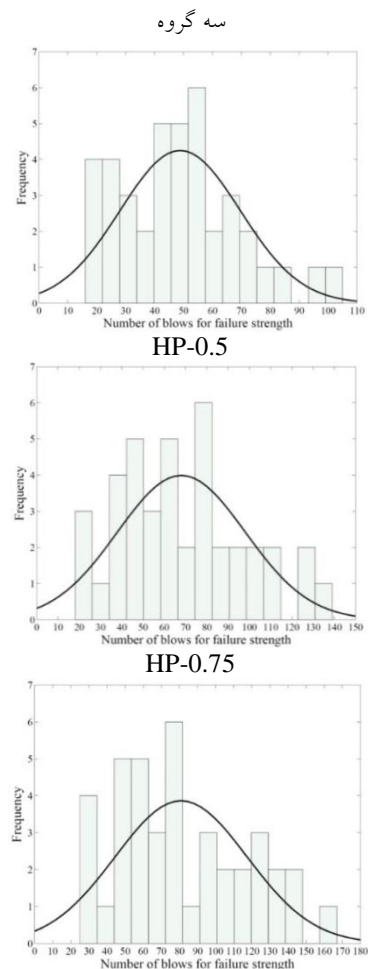


Fig. 8. Frequency histogram and fitted normal curve of the failure strengths distribution for all groups

۶-۳-۴- جذب انرژی نمونه‌ها

بیان شده است.

۶-۳-۶- تعداد تکرارهای هر آزمایش

از ضریب تغییرات ارائه شده در جداول ۵ تا ۶، می‌توان به منظور محاسبه کمینه تعداد ضربات لازم (n) به گونه‌ای که خطای به وجود آمده (e) کمتر از یک حد مشخص باشد، استفاده کرد. این تعداد ضربات لازم را می‌توان با استفاده از رابطه معادله (۱) محاسبه نمود [۲۹].

$$n = \frac{[COV]^2 t^2}{e^2} \quad (1)$$

در این رابطه COV ، ضریب تغییرات و t ، مقدار توزیع تابع استودنت برای یک سطح مشخص اطمینان است. مقدار تابع t استودنت فقط به مقدار سطح اطمینان وابسته نیست بلکه به درجه آزادی (مربوط به تعداد آزمایش‌ها) نیز وابسته است. برای درجات آزادی بالاتر از ۱۲۰، مقادیر تابع t استودنت برای ۹۵ و ۹۰٪ سطح اطمینان به ترتیب به مقادیر ۱/۶۴۵ و ۱/۲۸۲ میل می‌کند. در جدول (۵) مقدار کمینه تعداد تکرار برای درصد مختلف خطا در ۹۰٪ سطح اطمینان نشان داده شده است. مطابق این جدول در ۹۰٪ سطح اطمینان تعداد تکرارهای لازم برای هر آزمایش، به منظور اینکه مقدار خطا کمتر از ۱۰٪ باشد برای مقاومت اولین ترک در گروه‌های HP-0.5، HP-0.75 و HP-1 به ترتیب ۲۶، ۳۲ و ۳۶ تکرار است. همچنین برای مقاومت انهدام برای گروه‌های اول تا سوم در ۹۰٪ سطح اطمینان تعداد تکرارهای لازم برای داشتن خطای زیر ۱۰٪ به ترتیب ۳۰، ۳۲ و ۳۳ است. در جدول (۶) مقدار تعداد آزمایش‌های لازم برای درصد خطاهای مختلف در ۹۵٪ سطح اطمینان نشان داده شده است. مطابق این جدول تعداد آزمایش‌های لازم به منظور داشتن خطای زیر ۱۰٪ برای مقاومت اولین ترک گروه‌های HP-0.5، HP-0.75 و HP-1 به ترتیب ۴۳، ۵۲ و ۵۹ و همچنین برای مقاومت انهدام به ترتیب ۴۹، ۵۳ و ۵۵ تکرار است. مطابق نتایج نشان داده شده در جدول ۵ و ۶، افزودن الیاف به نمونه‌ها، موجب بالا رفتن تعداد دفعات تکرار آزمایش می‌شود.

انرژی حاصل از یک مرتبه افتادن وزنه $4/45Kg$ از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر روی گوی فولادی به قطر $63/5$ میلی‌متر با توجه به روابط فیزیکی (سقوط جسم آزاد) تقریباً برابر ۲۰ کیلو نیوتن-میلی‌متر است. گروه HP-1 دارای بیشترین مقدار انرژی جذب شده برای مقاومت اولین ترک و مقاومت انهدام است. متوسط انرژی جذب شده به وسیله گروه HP-1 در مقاومت انهدام به ترتیب ۶۶ و ۱۹٪ بیشتر از گروه‌های HP-0.5 و HP-0.75 است. پارامتر PINPB نشان دهنده درصد افزایش ضربات بعد از رخ دادن اولین ترک است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود متوسط مقدار پارامتر PINPB در گروه HP-1 به ترتیب ۴۰ و ۱۲٪ بیشتر از گروه‌های HP-0.5 و HP-0.75 است. افزودن الیاف موجب افزایش فاصله بین مقاومت انهدام و مقاومت نهایی می‌شود.

۶-۳-۵- علل ضریب تغییرات بالای آزمایش ضربه

بتن یک ماده کامپوزیتی، با ترکیبی از مواد سیمانی و سنگ دانه‌ها است. عدم یکنواختی و همگن بودن مصالح می‌تواند موجب بروز این اختلافات شود. همچنین چگونگی عملکرد این تست وزنه افتان مطابق با جزئیات ارائه شده در آیین‌نامه ACI-544 است. و این نوع تست به عنوان یک تست استاندارد برای مقاومت ضربه‌ای بتن شناخته می‌شود. از طرفی هر چه بتن یکنواخت‌تر بوده و خصوصیات مصالح آن از قبیل، ابعاد سنگدانه‌ها و ... یکسان باشد، اختلاف بین مقادیر کمتر است. برای مقادیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی ضریب تغییرات حدود ۱۰٪ در برخی از بررسی‌های آماری قابل قبول است، به ویژه اگر الیاف هم در بتن وجود داشته باشد. برای نتایج مقاومت ضربه‌ای هماهنگ با پژوهش‌های صورت گرفته و با استفاده از روش وزنه افتان که توسط آیین‌نامه ACI-544 ارائه شده است، ضریب تغییرات برای داده‌های آماری تا حدود ۵۰ درصد نیز می‌تواند باشد. به عنوان نمونه در مرجع گفته شده در قسمت زیر ضریب تغییرات داده‌های آماری مقاومت ضربه‌ای برای مقاومت اولین ضربه $44/42$ و برای مقاومت نهایی $42/41$ ٪

مربوط به گروه HP-1 (۱ درصد الیاف) $6/24$ MPa است که به ترتیب ۲۹ و ۲۱ درصد بیشتر از مقاومت خمشی نمونه‌های گروه HP-0.5 (۰/۵ درصد الیاف) و گروه HP-0.75 (۰/۷۵ درصد الیاف) است. بیشینه ضریب تغییرات گروه HP-1 $9/88$ است که به ترتیب ۱۱ و $8/$ بیشتر از ضریب تغییرات گروه‌های HP-0.5 و HP-0.75 بود.

۳- مقاومت‌های ضربه‌ای به دست آمده از آزمایش وزنه افتان دارای مقادیر انحراف از معیار و همچنین ضریب تغییرات بزرگتری نسبت به سایر نمونه‌های (نمونه‌های فشاری و خمشی) بودند.

۴- با افزایش درصد الیاف، تعداد ضربات لازم به منظور رخ دادن اولین ترک و همچنین مقاومت انهدام، افزایش یافت. گروه HP-1 (۱ درصد الیاف) دارای مقاومت ضربه‌ای بالاتری نسبت به دو گروه دیگر بود. مقاومت متوسط انهدام گروه HP-1 به ترتیب ۶۶ و $19/$ بیشتر از گروه HP-0.5 (۰/۵ درصد الیاف) و گروه HP-0.75 (۰/۷۵ درصد الیاف) است.

۵- ضریب تغییرات در گروه HP-1 (۱ درصد الیاف) برای مقاومت اولین ضربه به ترتیب ۱۶ و $6/$ بیشتر از گروه‌های HP-0.5 (۰/۵ درصد الیاف) و HP-0.75 (۰/۷۵ درصد الیاف) است. همچنین ضریب تغییرات برای مقاومت انهدام در گروه HP-1 به ترتیب ۷ و $2/$ بیشتر از گروه HP-0.5 و گروه HP-0.75 بود.

References

- [1] Aveston, J., Cooper, G.A., and Kelly, A. Single and multiple fracture in the properties of fiber composites, Conf. Proc., pp. 15-24. IPC Science and Technology Press Ltd, (1971).
- [2] Krenchel, H. and Stang, H. Stable microcracking in cementitious materials, In Brittle Matrix Composites 2. A.M. Brandt and J.H. Marshall, eds., pp. 20-33, (1989).
- [3] Curbach, M. and Jesse, F. High-performance textile-reinforced concrete, Structural Engineering International, 9(4, 1), pp. 289-291(3), (1999).
- [4] Reinhardt, H.W., Krüger, M. and Große, C.U. Concrete prestressed with textile fabric, Journal of Advanced Concrete Technology 1(3), pp. 231-239, (2003).
- [5] Allen, H.G. Stiffness and strength of two glass-fiber reinforced cement laminates, Journal of Composite Materials 5(2), pp. 194-207, (1971).

۸. مراجع

جدول ۵. تعداد تکرارهای مورد نیاز برای نگه داشتن خطا در محدوده 90% سطح اطمینان

Error (e%)	90% level of confidence					
	HP-0.5		HP-0.75		HP-1	
	FC	UR	FC	UR	FC	UR
<10	26	30	32	32	36	33
<15	12	13	14	14	16	15
<20	7	7	8	8	9	8
<25	4	5	5	5	6	5
<30	3	3	4	4	4	4
<35	2	2	3	3	3	3
<40	2	2	2	2	2	2
<50	1	1	1	1	1	1

Table. 5. Number of replications required to keep the error under a specific limit at 90% level of confidence

جدول ۶. تعداد تکرارهای مورد نیاز برای نگه داشتن خطا در محدوده 95% سطح اطمینان

Error (e%)	95% level of confidence					
	HP-0.5		HP-0.75		HP-1	
	FC	UR	FC	UR	FC	UR
<10	43	49	52	53	59	55
<15	19	22	23	24	26	24
<20	11	12	13	13	15	14
<25	7	8	8	8	9	9
<30	5	5	6	6	7	6
<35	4	4	4	4	5	4
<40	3	3	3	3	4	3
<50	2	2	2	2	2	2

Table. 6. Number of replications required to keep the error under a specific limit at 95% level of confidence

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه، آثار الیاف PP روی پارامترهای آماری و ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی) و مقاومت ضربه‌ای بتن‌های توانمند کامپوزیتی به صورت آزمایشگاهی و آماری بررسی شد.

۱- مطابق نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی، مشخص شد که با افزودن الیاف، ضریب تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با اضافه نمودن الیاف ضریب تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها از $4/96$ درصد به $8/42$ درصد افزایش پیدا کرد.

۲- داده‌های آماری به دست آمده برای مقاومت خمشی دارای توزیع تقریباً نرمالی بودند. مقاومت خمشی میانگین

- and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010) 879e886.
- [19] Atef Badr, Ashraf F. Ashour, Andrew K. Platten, Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering* Volume 32, Issue 11, November 2006, Pages 1907–1920.
- [20] Hakan Nuri Atahan, Bekir Yılmaz Pekmezci, Erman Yiğit, Behavior of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Static and Impact Flexural Effects, *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 2013.25:1438-1445.
- [21] Mahmoud Nili, V. Afroughsabet, The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 927–933.
- [22] Tara Rahmani, Behnam Kiani, Mohammad Shekarchi, Abdollah Safari, Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test, *Construction and Building Materials*, Volume 37, December 2012, Pages 360-369.
- [23] M.Mastali, A. Dalvand "Use of silica fume and recycled steel fibres in self-compacting concrete (SCC)", *Journal of Construction and Building Materials*, Volume 125, 30 October 2016, Pages 196–209.
- [24] M. Mastali, A. Dalvand, M. Fakharifar "Statistical variations in the Impact resistance and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced self-compacting concrete", *Journal of Computers and Concrete*. 18(1) · June 2016.
- [25] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. satarifar, "The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers", *Journal of Cleaner Production*. Volume 124, 15 June 2016, Pages 312–324.
- [26] M.Mastali, A. Dalvand "The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces", *Journal of Composites Part B: Engineering* . Volume 92, 1 May 2016, Pages 360–376.
- [27] R.N. Swamy, H. Stavrides, Some statistical considerations of steel fiber composites, *Cement and Concrete Research*, Volume 6, Issue 2, March 1976, Pages 201–216.
- [28] Day KW. Concrete mix design, quality control and specification, 2nd Edition. London: E&FN Spon; 1999.
- [6] Bache, H. Densified cement/ultra-fine particle-based materials, CBL Rapport No. 40, Aalborg Portland, ISBN 87-89132-00-9, (1981).
- [7] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites, In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-4)*, Proc. of the 4th Int'l RILEM Workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds. Published by RILEM S.A.R.L., (2003)
- [8] Chanvillard, G. and Rigaud, S. Complete characterization of tensile properties of ductal UHPFRC according to the French recommendations, In *Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds, pp. 21-34. RILEM Publications S.A.R.L., (2003)
- [9] Li, V.C. From Micromechanics to Structural Engineering – the design of cementitious composites for Civil Engineering applications, *JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering* 10(2), pp.37-48, (1993).
- [10] Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements, *Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites*, pp. 29-36. Warsaw, Poland, (2003).
- [11] Kong, H.J., Bike, S. and Li, V.C. Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization, *Journal of Cement and Concrete Composites* 25(3), pp. 301-309, (2003).
- [12] Lepech, M.D. and Li, V.C. Large scale processing of engineered cementitious composites, *ACI Materials Journal*, (2007).
- [13] Kishi N, Konno H, Ikeda K, Matsuoka KG. Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rocksheds. *Int J Impact Eng* 2002;27(9):969–85.
- [14] Ong KCG, Basheerkhan M, Paramasivam P. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact. *Cement Concr Compos* 1999;21(5–6):391–401.
- [15] Mindess S, Cheng Y. Perforation of plain and fibre reinforced concretes subjected to low-velocity impact loading. *Cement Concr Res* 1993;23(1):83–92.
- [16] Barr B, Baghli A. A repeated drop-weight impact testing apparatus for concrete. *Mag Concr Res* 1988;40(144):167–76.
- [17] ACI Committee 544, Measurement of properties of fiber reinforced concrete, *ACI Mater. J.* 85 (6) (1988) 583–593.
- [18] Mahmoud Nili, V. Afroughsabet, Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance

Experimental Study on Impact Behavior of High Performance Concrete with Statistical Approach

A. dalvand^{1*}, F. Omidinasab², I. Bahrami Chegeni³

1-Assist. Prof., Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2-Assist. Prof., Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3-Lecturer, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

dalvand.a@lu.ac.ir

Abstract:

High-performance concrete (HPC) is an improved version of normal concrete, in term of properties and constructability. Normal and special materials are used to make these specially designed concretes that must meet a combination of performance requirements. Special mixing, placing, and curing practices may be needed to produce and handle high-performance concrete. Extensive performance tests are usually required to demonstrate compliance with specific project needs (ASCE 1993, Russell 1999, and Bickley and Mitchell 2001). High-performance concretes are made with carefully selected high-quality ingredients and optimized mixture designs; these are batched, mixed, placed, compacted and cured to the highest industry standards. Typically, such concretes will have a low water-cementing materials ratio of 0.20 to 0.45. Plasticizers are usually used to make these concretes fluid and workable. High-performance concrete (HPC) has been primarily used in tunnels, bridges, and tall buildings for its strength, durability, and high modulus of elasticity. They are placed in a class of fiber cement composites with fine aggregates that exhibit tensile strain hardening response under uni-axial loading. These materials are characterized by pseudo-ductile tensile strain hardening behavior and multiple cracking prior to failure. This figure emphasizes the transition from brittle concrete to quasi-brittle FRC (strain softening behavior after first cracking) to ductile HPFRCC with strain hardening behavior after first cracking. In recent years, a new class of HPFRCC has emerged as ECC. Engineered Cementitious Composite (ECC) has been developed in University of Michigan, which had a typical moderate tensile strength of 4-6 MPa and ductility of 3-5%. Since there is not enough available information to give mechanical characteristics and also to calculate the mean, standard deviation and coefficient of variation, some statistical evaluations are necessary to obtain accurate results of the effect of inclusion of PP fiber on absorbed energy and impact resistance of concrete. Concrete is a heterogeneous material, and that is why results obtained from several tests are often significantly scattered. There is a little quantitative statistical data on the effect of PP fiber on compressive, flexural strength of HPC in the other researches; therefore, the necessity to study the mentioned parameters while using the PP fiber is felt. Obtained data were statistically analyzed. 240 concrete specimens were prepared in three groups with different mix designs, containing 0.5, 0.75 and 1 percent of PP fibers. Twenty 100×100×100mm cubic specimens, twenty 320×80×60mm beam specimens and forty 150×64mm discs were cast from each mixture. Cubic specimens were used to determine the compressive strength, beam specimens were tested to obtain flexural strength and cylindrical cutting specimens (discs) were subjected to the drop-weight test following the ACI committee 544 to determine impact strength of mixed concretes. Statistical analysis performed based on these experimental tests showed that in comparison with data of impact strength, data of mechanical properties is less dispersed. Also while increasing the percentage of fibers, data dispersion increases. According to results of compressive strength test on cubic specimens, adding fibers to specimens increased the coefficient of variations of compressive strength. The coefficient of variations of compressive strength for HPFRCC was increased from 4.96 % to 8.42 %. Also Statistical data for flexural strength are almost normally distributed. Mean flexural strength in HP-1 group (1% fiber) was 6.24 MPa, which is 29 % and 21 % more than HP-0.5 group (0.5 % fiber) and HP-0.75 group (0.75 % fiber), respectively. HP-1 group's coefficient of variation is 9.88% which is 11% and 8% more than the same parameter in HP-0.5 and HP-0.75 groups, respectively.

Keywords: High-performance concrete, Statistical data, Impact behavior, Flexural strength.