

بررسی آماری مقاومت خمشی و فشاری بتن های توانمند الیافی HPFRCC

محمد کاظم شربتدار 1، ابوذر حمزه نژادی 1، احمد دالوند 2

1- دانشیار، گروه عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

msharbatdar@semnan.ac.ir

1- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

civil_abuzar@yahoo.com

2- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

ahmad.dalvand@gmail.com

چکیده

در این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی با رویکرد آماری، بر مقاومت فشاری و خمشی بتن های (HPFRCC) انجام شده است. به همین منظور سه سری نمونه های بتنی با $0/5\%$ ، $0/75\%$ و 1% الیاف PP ساخته شد. در مجموع 120 نمونه بتنی که از هر طرح اختلاط، 20 نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100$ و 20 نمونه تیر کوچک به ابعاد $320 \times 80 \times 60$ mm ساخته شد. از نمونه های مکعبی به منظور تعیین مقاومت فشاری و از تیرهای کوچک به منظور تعیین مقاومت خمشی استفاده شد. بر روی داده های به دست آمده از آزمایشات آنالیز آماری صورت گرفت، آنالیز آماری صورت گرفته نشان داد با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری افزایش یافته و همچنین ضریب تغییرات و انحراف از معیار نمونه ها و پراکندگی داده ها نیز زیاد می گردد.

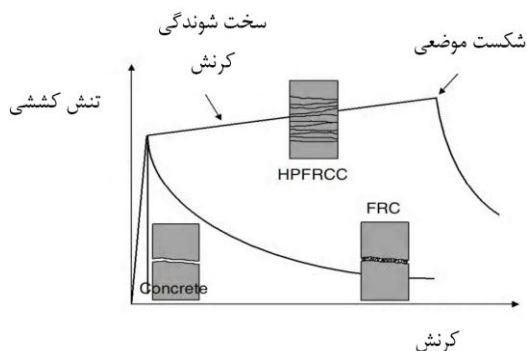
واژه های کلیدی: توانمند، الیافی، آماری، مقاومت، خمش، فشار.

1. مقدمه

کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی (FRCC) در سال های اخیر شاهد پیشرفت های زیاد و چشمگیری بوده اند. عمده ای این پیشرفت ها به سبب توسعه ای هر چه بیشتر ملات، گونه های مختلف الیاف، اندرکنش ملات-الیاف، فرایند تولید کامپوزیت، درک مناسب تر در خصوص مکانیزم های اصلی کنترل رفتار و بهبود مستمر میزان هزینه های اجرایی می باشد. علاوه بر آن می توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی (فوق روان کننده ها) با امکان دستیابی به مقاومت های بالا همراه با کمترین کاهش در کارایی ملات، کاربرد ریز پرکننده ها مثل دوده سیلیسی و خاکستر بادی و فهم بهتر از چگونگی تاثیر آنها بر تخلخل، مقاومت و دوام ملات اشاره نمود. این موارد همگی باعث پیشرفت های اساسی در ساخت و مدل سازی رفتار این کامپوزیت ها شده اند. نسبت دادن واژه های پیشرفته یا توانمند به مصالح مهندسی بیانگر تفاوت آنها با مصالح متداول و معمولی است که با توجه به آخرین فناوری ها و موقعیت مکانی آنها در سازه بکار می رود. واژه توانمند (High Performance) به رده ای

خاصی از مصالح بتن الیافی اطلاق می‌شود که دارای رفتار سخت‌شوندگی کرنش (Strain Hardening) تحت کشش پس از بروز اولین ترک‌خوردگی‌ها هستند که همراه با شکل‌گیری ترک‌های چندگانه (Multiple Cracking) و رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد است. استفاده از مصالح توانمند به جای مصالح متداول از مدت‌ها پیش مد نظر پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات بسیاری را به خود اختصاص داده است. این مصالح علاوه بر افزایش ظرفیت سازه‌ها در برابر زلزله، به تامین پایایی بیشتر سازه‌ها در برابر عوامل مضر محیطی نیز کمک می‌کنند. یکی از این مصالح توانمند که در سالیان اخیر، پیشرفت چشمگیری داشته، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) می‌باشد.

در دهه‌ی 1960، رامولدی و همکاران بررسی تاثیر الیاف فولادی بر کاهش شکنندگی بتن را در دستور کار قرار دادند [1 و 2]. این روند با کاربرد سایر انواع الیاف ادامه یافت و در سال‌های اخیر ترکیب انواع الیاف با طول‌های مختلف در دستور کار قرار گرفت. گسترش دانش در خصوص چگونگی تاثیر الیاف بر ملات، منجر به تدوین توصیه‌هایی در مورد طراحی سازه‌ای توسط موسسه RILEM گردید [3 و 4]. در اوایل دهه‌ی 1980، تولید یک مصالح بتن الیافی با رفتار کششی شکل‌پذیر مورد توجه قرار گرفت که شروع آن توسط اوستون و همکاران در سال 1971 بود [5]. در سال 1989 کرنچل و استانگ با کاربرد مناسب الیاف به هم پیوسته به شکل-پذیری کششی 100 برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند [6]. در سال 1999 کورباچ و جسی و در سال 2003 نیز نامان و رینهارت و همکاران نوع جدیدی از بتن الیافی با الیاف به هم پیوسته تحت عنوان بتن مسلح بافته شده (TRC) را ارائه نمودند [7 و 8]. نامان و رینهارت در سال 2003 مصالحی را معرفی نمودند که جدا از FRC ها طبقه‌بندی می‌شدند و شامل یک بخش سخت‌شوندگی کرنش در منحنی تنش-کرنش کششی خود بودند و در رده مصالح توانمند (HPFRCC) قرار گرفتند. بیشتر اعضای ساخته شده با این مصالح، شامل ملات سیمانی بدون درشت دانه هستند و به همین دلیل ملات یا خمیر سیمانی مسلح شده توسط الیاف نام گرفته‌اند [9 تا 14]. هر چند (HPFRCC) دارای ویژگی‌هایی است که در بتن معمولی و FRC وجود ندارد اما به علت مسائل اقتصادی و اجرایی، کاربرد آنها بیشتر به امور تحقیقاتی و کاربردهای خاص محدود گشته است. منحنی‌های تنش-کرنش کششی بتن معمولی، FRC و (HPFRCC) و نحوه‌ی انهدام آنها در شکل 1 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تنها در مصالح (HPFRCC) ترک‌های چندگانه تشکیل می‌گردد.



شکل (1): مقایسه رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و HPFRCC

2. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق 3 سری نمونه بتنی با نسبت آب به سیمان 0/38 ساخته شد. نمونه‌های ساخته شده بترتیب دارای 0/5٪، 0/75٪ و 1٪ الیاف PP بودند. سه سری نمونه های بتنی بر حسب درصد الیاف نامگذاری شدند. نمونه های ساخته شده با 0/5٪ الیاف (HP-0.5)، نمونه های با 0/75٪ الیاف (HP-0.75) و نمونه های با 1٪ الیاف (HP-1) نامگذاری شدند. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های بتنی با سن 28 روزه می‌باشد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد 100mm مطابق با ASTM C39 انجام شد. همچنین آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد 320×80×60mm مطابق با ASTM C78 انجام گردید.

3. طرح اختلاط و خصوصیات مصالح

در این کار آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II (ASTM Type II) استفاده شد. خصوصیات سیمان استفاده شده در جدول 1 نشان داده شده است. الیاف استفاده شده در این تحقیق از نوع PP می‌باشند. در جدول 2 خصوصیات مکانیکی الیاف PP نشان داده شده است و به منظور افزایش کارایی بتن اختلاط از یک فوق روان کننده با نام تجاری Mape110 استفاده شد. رویه ساخت بتن به قرار زیر می‌باشد: ابتدا سیمان به همراه سنگدانه‌ها به مدت یک دقیقه مخلوط شدند. در مرحله بعد روان کننده به همراه آب به مخلوط اضافه شده و به مدت دو دقیقه مخلوط شدند. در نهایت الیاف به مخلوط اضافه شد. درصد مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه ها در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول (1): خصوصیات سیمان مورد استفاده

Composition	Cement
SiO ₂	21.1
Al ₂ O ₃	4.37
Fe ₂ O ₃	3.88
MgO	1.56
K ₂ O	0.52
Na ₂ O	0.39
CaO	63.33
C ₃ S	51
C ₂ S	22.7
C ₃ A	5.1
C ₄ AF	11.9
Physical properties	
Specific gravity	3.11
Specific surface (cm ² /gr)	3000

جدول (2): خصوصیات الیاف PP

طول (mm)	قطر (mm)	رنگ	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m^3)
12	0/018	سفید	800	10	910

جدول (3): درصد مصالح مورد استفاده در هر مترمکعب بتن

Mix No.	Label	($\frac{Water}{Cement}$)	Cement ($\frac{kg}{m^3}$)	PP Fibers (%)	Fine agg ($\frac{kg}{m^3}$)	SP ($\frac{kg}{m^3}$)
1	HP-0.5	0.38	980	0.5	980	3
2	HP-0.75	0.38	980	0.75	980	3
3	HP-1.00	0.38	980	1	980	3

بتن آماده شده درون قالب‌های مکعبی به ابعاد (100mm) و همچنین قالب های منشوری (320×80×60 mm) به ترتیب برای انجام آزمایش تست مقاومت فشاری و تست خمشی، ریخته شدند. و همه نمونه‌ها قبل از باز کردن قالب به مدت 24 ساعت در محیط 100% مرطوب و در دمای 23°C نگهداری شدند. پس از باز کردن قالب ها، نمونه‌ها درون آب با دمای 23°C به مدت 28 روز قرار داده شدند. پس از گذشت 28 روز از بتن ریزی، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند.

5. بررسی مشاهدات و نتایج

1.5. مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی بر طبق ASTM C39 انجام گردید. آزمایش با استفاده از یک ماشین تست دیجیتال استاندارد به ظرفیت 2000kN انجام شد. نمونه‌ها و دستگاه تست در شکل 2 نشان داده شده‌اند.



شکل (2): نمونه های مکعبی ساخته شده و دستگاه تست مقاومت فشاری

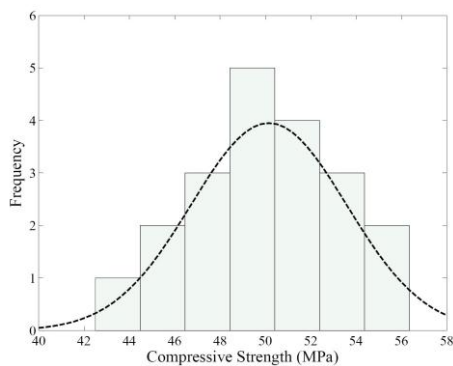
نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه ها در **جدول 4** نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد، با افزایش درصد الیاف مقاومت متوسط فشاری افزایش می یابد. در **شکل 3** هیستوگرام (histogram) مربوط به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری 60 نمونه مربوط به سه طرح اختلاط نشان داده شده است. **شکل 3** نشان می دهد که نتایج هر سه سری بتن تقریباً دارای توزیع نرمال (normally distributed) می باشند و به خوبی بر منحنی توزیع نرمال منطبق هستند. نمونه های گروه (HP-1) در بین گروه های دیگر دارای میانگین مقاومت فشاری بالاتری می باشند.

گروه (HP-1) دارای بیشترین انحراف از معیار می باشد به طوری که انحراف از معیار این گروه به ترتیب 104٪ و 36٪ بیشتر از گروه (HP-0.5) و (HP-0.75) می باشد. همانطوری که ملاحظه می گردد با افزایش درصد الیاف، پراکندگی داده های آماری مربوط به مقاومت فشاری بیشتر می گردد. همچنین ضریب تغییرات و انحراف از معیار نمونه ها با افزایش درصد الیاف افزایش می یابد.

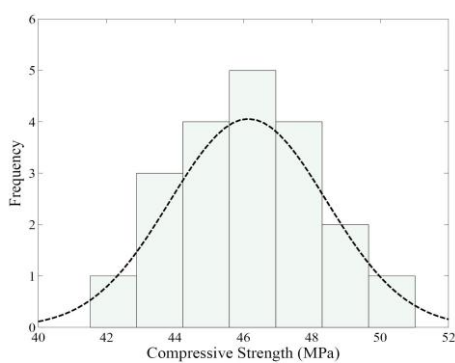
جدول (4): خلاصه نتایج مربوط به تست مقاومت فشاری

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

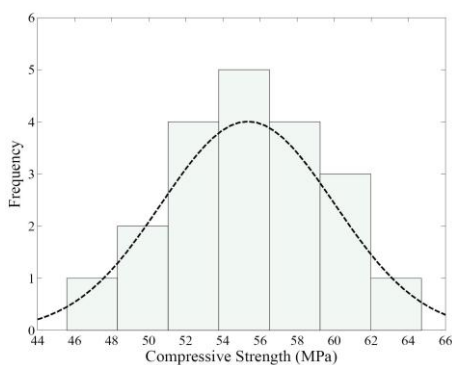
SD= standard deviation; CoV= coefficient of variation



ب- بتن با 0/75 الیاف (HP-0.75)



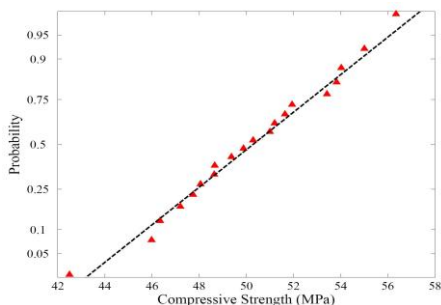
الف- بتن با 0/5 الیاف (HP-0.5)



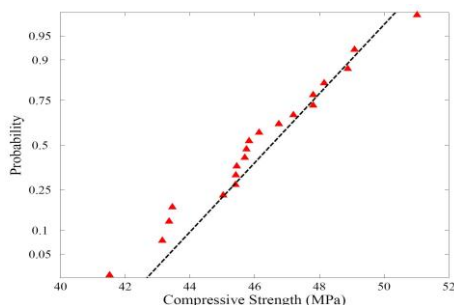
پ- بتن با 1 الیاف (HP-1)

شکل (3): هیستوگرام مقاومت فشاری و منحنی توزیع نرمال داده ها

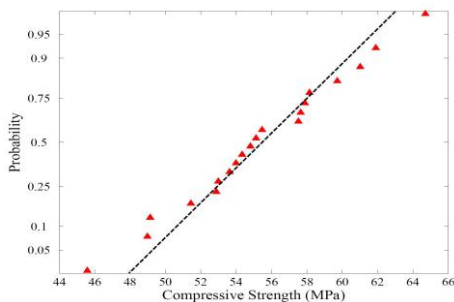
در ضوابط پذیرش مقاومت فشاری بتن یک انحراف معیار 4 تا 6MPa قابل پذیرش می باشد [15]. مقادیر پایین ضریب تغییرات گواه خوب بودن کیفیت بتن و کنترل کیفیت خوب نمونه ها می باشد. مقادیر ضریب تغییرات به دست آمده برای سه سری نمونه از حداکثر مقدار 15٪ که به وسیله Swamy and Stavrides [16] پیشنهاد شده کمتر می باشد. علاوه بر آن Day [15] پیشنهاد می دهد که یک ضریب تغییرات کوچکتر از 10٪ نشان دهنده یک کنترل کیفیت مناسب می باشد. در شکل 4 نمودار توزیع احتمال نرمال داده های مربوط به مقاومت فشاری نشان داده شده است. مطابق این نمودار داده های آزمایش در اطراف خط توزیع نرمال داده ها پراکنده می باشند و داده های کمی بر روی خط توزیع نرمال قرار دارند.



ب- بتن با 0/75 الیاف (HP-0.75)



الف- بتن با 0/5 الیاف (HP-0.5)

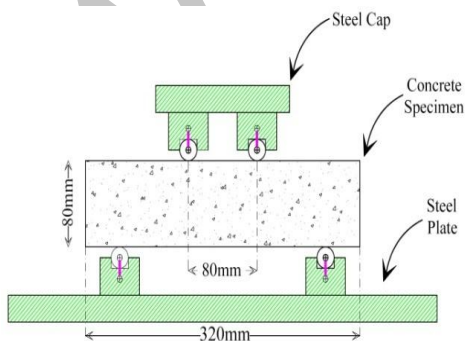


ب- بتن با 1 الیاف (HP-1)

شکل (4): توزیع احتمال نرمال داده‌های مربوط به تست فشاری

2.5. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی از طریق آزمایش خمش (flexural test) یک تیر به ابعاد $320 \times 80 \times 60 \text{mm}$ محاسبه گردید. به منظور تعیین مقاومت خمشی نمونه‌ها 60 نمونه تیر تست گردید. نمای کلی دستگاه تست خمشی و ابعاد نمونه‌ها در شکل 5 نشان داده شده است.

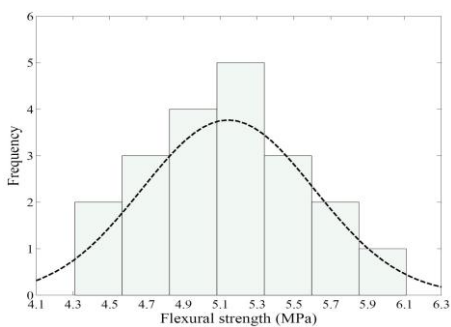


شکل (5): نمونه‌های خمشی و دستگاه تست مقاومت خمشی

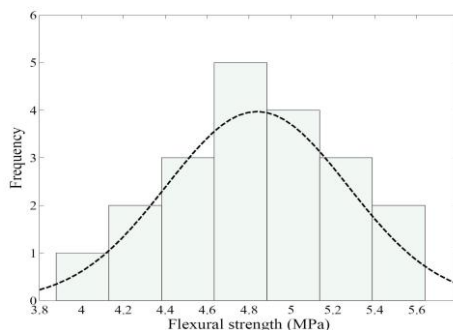
نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بر روی 60 نمونه برای سه گروه در جدول 5 ارائه گردیده است. مطابق این جدول گروه سوم دارای بیشترین مقدار متوسط در بین دو گروه دیگر است. مقاومت خمشی میانگین مربوط به گروه (HP-1) به ترتیب 29 و 21 درصد بیشتر از مقاومت خمشی نمونه‌های گروه (HP-0.5) و (HP-0.75) می‌باشد. انحراف از معیار (HP-1) به ترتیب 42٪ و 33٪ بیشتر از گروه‌های (HP-0.5) و (HP-0.75) می‌باشد. در شکل 6 نمودار هیستوگرام (histogram) مربوط به مقاومت خمشی همه نمونه نشان داده شده است. شکل 6 نشان می‌دهد که مقاومت خمشی برای سه گروه دارای توزیع تقریباً نرمالی می‌باشد. ضریب تغییرات گروه (HP-1) به ترتیب 11٪ و 8٪ بیشتر از ضریب تغییرات گروه‌های (HP-0.5) و (HP-0.75) است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد با افزایش درصد الیاف، ضریب تغییرات نیز افزایش می‌یابد. افزایش ضریب تغییرات با افزودن الیاف نشان می‌دهد که استفاده از الیاف موجب پراکنده تر شدن داده‌ها می‌گردد. همچنین افزایش درصد الیاف موجب افزایش مقاومت خمشی نیز می‌گردد. در شکل 7 نمودار توزیع احتمال نرمال داده‌های مربوط به مقاومت خمشی سه گروه نشان داده شده است.

جدول (5): خلاصه نتایج مربوط به تست مقاومت خمشی

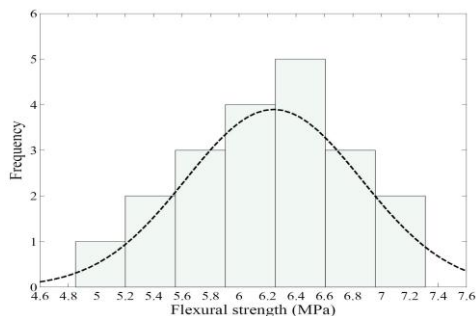
Specimen No.	Modulus of rupture (MPa)		
	HP-0.5	HP-0.75	HP-1
1	4.70	5.27	6.11
2	4.80	5.13	6.88
3	5.64	5.60	5.89
4	4.35	5.02	6.58
5	4.41	5.11	5.74
6	5.21	4.71	6.39
7	4.67	4.31	6.84
8	4.27	5.51	6.20
9	5.38	5.59	5.74
10	3.88	4.94	6.78
11	4.86	4.56	6.20
12	5.29	4.32	7.14
13	5.11	5.83	6.53
14	4.69	5.32	4.85
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



ب- بتن با 0/75 الیاف (HP-0.75)

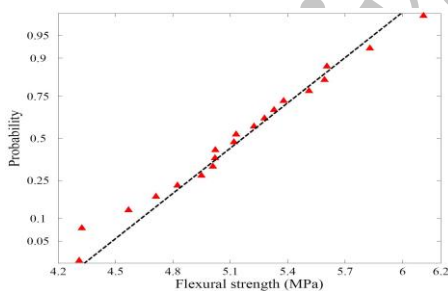


الف- بتن با 0/5 الیاف (HP-0.5)

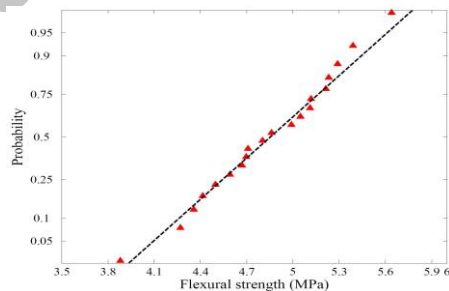


ب- بتن با 1 الیاف (HP-1)

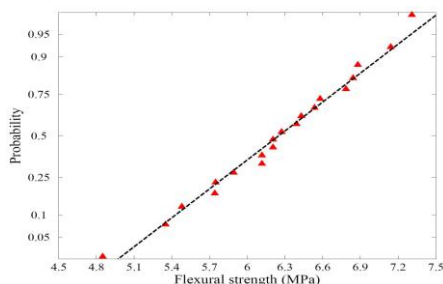
شکل (5): هیستوگرام مقاومت خمشی و منحنی توزیع نرمال داده ها



ب- بتن با 0/75 الیاف (HP-0.75)



الف- بتن با 0/5 الیاف (HP-0.5)



ب- بتن با 1 الیاف (HP-1)

شکل (7): توزیع احتمال نرمال داده‌های مربوط به تست خمشی

6. نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرات الیاف PP بر روی پارامترهای آماری و خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی) کامپوزیت های HPFRCC به صورت آزمایشگاهی و آماری بررسی گردید.

1- مطابق نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی، مشخص گردید که با افزودن الیاف، ضریب تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابد. با اضافه نمودن الیاف ضریب تغییرات مقاومت فشاری کامپوزیت های HPFRCC از 4/96٪ به 8/42٪ افزایش پیدا کرد.

2- با افزایش درصد الیاف مقاومت متوسط فشاری افزایش می یابد به طوری که در نمونه های با 1 درصد الیاف این افزایش به اندازه 20 درصد نسبت به نمونه های با 0/5 درصد الیاف بود.

3- داده های آماری به دست آمده برای مقاومت خمشی دارای توزیع تقریباً نرمالی بودند. مقاومت خمشی میانگین مربوط به گروه (HP-1) (1٪ الیاف) 6/24MPa می باشد که به ترتیب 29 و 21 درصد بیشتر از مقاومت خمشی نمونه های گروه (HP-0.5) (0/5٪ الیاف) و گروه (HP-0.75) (0/75٪ الیاف) می باشد. حداکثر ضریب تغییرات گروه (HP-1) 9/88٪ می باشد که به ترتیب 11٪ و 8٪ بیشتر از ضریب تغییرات گروه های (HP-0.5) و (HP-0.75) بود.

9. مراجع

- [1] Romualdi J.P. and Batson G.B., 1963. "Mechanics of crack arrest in concrete". Journal of Engineering Mechanics, ASCE Proc., 89(EM3):147-168.
- [2] Romualdi J.P. and Mandel J.A. 1964. "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement". Journal of ACI, :657-670.
- [3] Bolander, J. 1999. "Spring network model of fiber reinforced cement composites". High Performance Fiber Reinforced Cement Composites . HPFRCC 3,. H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, 341-350.
- [4] Vandewalle, L., et al, 2003. "RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete", Sigma-epsilon-design method - Final Recommendation. Materials and Structures 36(262):560-567.
- [5] Aveston, J., Cooper, G.A., and Kelly, A. 1971. "Single and multiple fracture, the properties of fiber composites". Conference Proceedings of National Physical Laboratory, IPC, Science and Technology Press, Ltd., 14-24.
- [6] Krenchel, H. and Stang, H. 1989. "Stable microcracking in cementitious materials". In Brittle Matrix Composites 2. A.M. Brandt and J.H. Marshall, eds., 20-33.
- [7] Curbach, M. and Jesse, F. 1999. "High-Performance Textile-Reinforced Concrete", Structural Engineering International 9(4, 1):289-291(3).

- [8] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. 2003. "Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites". In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HFRCC-4), Proc. Of the 4th Int'l RILEM Workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt.
- [9] Naaman, A.E. 1992. "SIFCON: Tailored properties for structural performance". In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, eds., 18-38.
- [10] Alwan, J., and Naaman, A.E., 1994. "New formulation for the elastic modulus of fiber reinforced quasi brittle matrices". ASCE Journal of Engineering Mechanics, 120 (11), 2443-2460.
- [11] Balaguru, P., and Shah, S.P., 1992. "Fiber reinforced cement composites". McGraw Hill, New York.
- [12] Bentur, A., and Mindess, S., 1990. "Fiber reinforced cementitious composites". Elsevier Applied Science, London, UK.
- [13] Bolander, J., and Saito, S., 1997. "Discrete modeling of short fiber reinforcement in cementitious composites". Journal of Cement Based Materials, (6), 76-86.
- [14] Brandt, A., Li, V.C., and Marshall, I.H., Editors, 2000. "Brittle matrix composites 6", BMC-6., Woodhead Publishing Limited, Cambridge and Warsaw.
- [15] [27] Day KW. Concrete mix design, quality control and specification, 2nd Edition. London: E&FN Spon; 1999.
- [16] [28] R.N. Swamy, H. Stavrides, Cem Concr Res 6 (1976) 201–216.

Archive of SID