





دانشکده مهندسی عمران
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

بررسی اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق توانمند و آرماتورهای فولادی

نگارنده: امیررضا میرفرهودی

استاد راهنما
دکتر علی کیهانی

خرداد ۱۳۹۶

شماره: ۲۵۳،۹۶
تاریخ: ۹/۵/۳۰

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر رضا میرفرهودی با شماره دانشجویی ۹۱۰۷۳۹۴ رشته عمران گرایش سازه تحت عنوان بررسی اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق توانمند و آرماتورهای فولادی که در تاریخ ۱۳۹۶/۳/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ... درجه ...) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	علی کهنی نژاد	دانشیار	(کهنی)
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	مهدی	استادیار	(مهدی)
۵- استاد ممتحن اول	فرزین باستانی	استادیار	(باستانی)
۶- استاد ممتحن دوم	محمد شهن اشرفی	استادیار	(اشرفی)

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

از طرف معاون اجرایی

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود
را سپر بلائی مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن

ایستاده ام برسم.

تشکر و قدردانی:

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند؛ و سلام و درود بر حضرت محمد صلی الله علیه و آله و سلم و خاندان پاک او، ائمه و طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است....

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمُنْعِمَ مِنَ الْمَخْلُوقِينَ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهَ عَزَّ وَجَلَّ؛ هر که در قبال خوبی مردم تشکر نکند، از خداوند عَزَّ وَجَلَّ هم تشکر نکرده است. ((امام رضا علیه السلام))": از مادر، پدر، همسر و خواهر و برادرم، این معلمان بزرگواری که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یآوری بی‌چشم‌داشت برای من بوده اند؛ از استاد با کمالات و شایسته، صبور و با تقوا، فرزانه و دلسوز، جناب آقای دکتر علی کیهانی، به عنوان استاد راهنمای اینجانب که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند؛ و البته زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پایان‌نامه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید. شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا، بر منتهای همت خود کامران شدم.

امیر رضا میرفرهودی

بهار ۱۳۹۶

تعهد نامه

اینجانب امیررضا میرفرهودی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه بررسی اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق توانمند و آرماتورهای فولادی تحت راهنمایی دکتر علی کیهانی متعهد می شوم.

تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده فارسی:

هدف از این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی برای درک بهتر رفتار آن‌ها می‌باشد.

برای مطالعه آزمایشگاهی از آزمایش بیرون‌کشیدگی^۱ براساس استاندارد RILEM^۲ استفاده شد. در این آزمایش تنش پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتور فولادی در دو حالت آرماتور شماره ۱۲ و آرماتور شماره ۱۴ با طول پیوستگی و پوشش بتن برابر d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ بر روی ۹۶ نمونه بررسی گردید. مطالعات آزمایشگاهی یک روش ساده برای حالت‌هایی است که روش‌های تحلیلی به‌لحاظ پیچیدگی مسئله قادر به حل مسئله نمی‌باشند. رفتار نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی از این قبیل مسائل می‌باشد. اثر متقابل فولاد، بتن و نانوسیلیس، تسلیم آرماتور، ترک خوردگی بتن، باز توزیع تنش‌ها به‌لحاظ عدم باربری المان‌ها به‌علت خردشدگی از موضوعاتی هستند که پیچیدگی مسئله را بیان می‌نمایند. نتیجه حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن نانوسیلیس به بتن فوق‌توانمند، تنش پیوستگی نهایی نرمال شده افزایش یافته است. با افزایش پوشش آرماتور و افزایش طول پیوستگی مقدار تنش پیوستگی متوسط افزایش می‌یابد. براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده رابطه تنش پیوستگی برای بتن فوق‌توانمند با مقاومت بیشتر از ۱۱۰ مگاپاسکال اصلاح گردید.

کلمات کلیدی: ۱-نانوسیلیس ۲-آزمایش بیرون‌کشیدگی ۳-بتن فوق‌توانمند ۴-تنش پیوستگی.

¹ Pullout test

² Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages

مقاله مستخرج از پایان نامه:

بررسی اثر استفاده از نانوسیلیس در بتن فوق توانمند بر پیوستگی آرماتورهای فولادی

چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری،

۷ و ۸ بهمن ماه ۱۳۹۵

Fourth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture
and Urban Management, 2017

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: تعریف مساله و اهداف تحقيق
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ هدف تحقيق
۳	۳-۱ بيان مساله
۵	۴-۱ روش انجام تحقيق
۵	۵-۱ ساختار پايان نامه
۷	فصل دوم: بتن فوق توانمند
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ بتن فوق توانمند و بتن فوق توانمند اليافى
۱۱	۳-۲ مرورى کوتاه بر کاربردهاى بتن فوق توانمند
۱۸	۴-۲ آينده بتن فوق توانمند
۱۹	۵-۲ تاريخچه تحقيقات درباره بتن فوق توانمند
۲۱	۶-۲ اجزای تشكيل دهنده بتن فوق توانمند
۲۲	۱-۶-۲ سيمان پرتلند
۲۲	۲-۶-۲ ميكروسيليس
۲۲	۳-۶-۲ پودر كوارتز
۲۳	۴-۶-۲ شن كوارتز
۲۳	۵-۶-۲ فوق روان كننده
۲۴	۶-۶-۲ الياف فلزى

۲۴	۷-۶-۲ الیاف پروپیلن
۲۵	۷-۲ طرح اختلاط
۳۰	۸-۲ روند اختلاط
۳۲	۹-۲ رفتار حرارتی
۳۵	۱۰-۲ مقایسه میان بتن توانمند و بتن فوق توانمند
۳۶	۱۱-۲ خصوصیات بتن فوق توانمند
۳۷	۱-۱۱-۲ مقاومت فشاری بتن فوق توانمند
۳۷	۲-۱۱-۲ مقاومت کششی بتن فوق توانمند
۳۸	۳-۱۱-۲ مقاومت برشی بتن فوق توانمند
۳۹	۴-۱۱-۲ مقاومت خمشی بتن فوق توانمند
۳۹	۱۲-۲ پیوستگی بتن و آرماتور
۴۳	۱۳-۲ طول گیرایی
۴۳	۱۴-۲ تاثیر پوشش بتن روی آرماتور
۴۵	۱۵-۲ قطر و هندسه آرماتور
۴۶	۱۶-۲ نانوسیلیس
۴۹	فصل سوم: انواع آزمایش‌های پیوستگی و روابط تنش پیوستگی
۵۰	۱-۳ آزمایش‌های پیوستگی
۵۰	۱-۱-۳ آزمایش بیرون کشیدگی
۵۱	۲-۱-۳ آزمایش کششی
۵۱	۳-۱-۳ آزمایش تیری
۵۲	۴-۱-۳ آزمایش تیری طره‌ای
۵۳	۲-۳ روابط تنش پیوستگی

۵۳	..... Orangun, Jirsa, and Breen	۱-۲-۳	رابطه
۵۳	.....	۲-۲-۳	رابطه داروین و همکاران
۵۴	.....	۳-۲-۳	رابطه ژائو و داروین
۵۵	.....	۴-۲-۳	رابطه اصفهانی و رنگان
۵۵	.....	۳-۳	نمونه‌های مورد بررسی
۵۹	.....		فصل چهارم: بررسی و ارزیابی نتایج
۶۰	.....	۱-۴	مقدمه
۶۰	.....	۲-۴	مطالعه آزمایشگاهی
۶۰	.....	۱-۲-۴	طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند
۶۳	.....	۳-۴	آزمایش مقاومت فشاری
۷۱	.....	۴-۴	دستگاه آزمایش
۷۲	.....	۵-۴	نتایج مربوط به تنش پیوستگی آرماتور ۱۲
۷۸	.....	۶-۴	نتایج مربوط به تنش پیوستگی آرماتور ۱۴
	.....	۷-۴	بررسی طول پیوستگی و پوشش آرماتور به صورت جداگانه در تنش پیوستگی بتن و آرماتور فولادی
۸۹	.....	
۹۴	.....	۸-۴	اصلاح رابطه تنش پیوستگی موضعی
۹۹	.....		فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۰	.....	۱-۵	نتیجه‌گیری
۱۰۱	.....	۲-۵	پیشنهادات برای کارهای تحقیقاتی آتی
۱۰۲	.....		مراجع:

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۳	شکل ۱-۲ نیروگاه اتمی کاتنوم در فرانسه
۱۵	شکل ۲-۲ پل عابر پیاده ساکاتا میراری در ژاپن
۱۵	شکل ۳-۲ پل کابلی بر روی رودخانه نیپیگون در کانادا
۱۶	شکل ۴-۲ موزه تمدن اروپا و خاورمیانه، فرانسه
۱۶	شکل ۵-۲ نمای داخلی موزه تمدن اروپا و خاورمیانه
۴۱	شکل ۶-۲ رابطه شماتیک تنش پیوستگی-لغزش بری آرماتور ساده و آجدار
۴۲	شکل ۷-۲ تنش کششی حلقوی در بتن اطراف آرماتور و ترک‌های شعاعی ناشی از آن
۴۷	شکل ۸-۲ نانوسیلیس
۵۰	شکل ۱-۳ آزمایش بیرون کشیدگی
۵۱	شکل ۲-۳ آزمایش کششی
۵۶	شکل ۳-۳ بریدن لوله پلیکا برای تنظیم کردن طول پیوستگی
۵۶	شکل ۴-۳ نمونه‌گیری از بتن فوق‌توانمند با نمونه استاندارد استوانه‌ای
۵۷	شکل ۵-۳ ساختن نمونه‌های پیشنهادی
۵۷	شکل ۶-۳ نمونه‌های ساخته شده جهت انجام آزمایش بیرون کشیدگی
۶۲	شکل ۱-۴ مخلوط کردن مصالح خشک
۶۶	شکل ۲-۴ چرب کردن قالب‌ها
۶۶	شکل ۳-۴ نمودار میله‌ای آزمایشات مقاومت فشاری برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ و ۱۸۰ روز
۶۷	شکل ۴-۴ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری بتن
۶۸	شکل ۵-۴ مشخصات هندسی نمونه‌ها
۶۹	شکل ۶-۴ قالب‌گیری نمونه‌های ساخته شده براساس استاندارد RILEM

- شکل ۴-۷ قالب‌گیری نمونه‌های ساخته شده براساس استاندارد RILEM ۶۹
- شکل ۴-۸ میز ویبره استفاده شده برای متراکم کردن بتن فوق‌توانمند ۷۰
- شکل ۴-۹ نمونه‌برداری استوانه‌ای استاندارد ۷۰
- شکل ۴-۱۰ عمل‌آوری نمونه‌ها درون آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد ۷۱
- شکل ۴-۱۱ دستگاه آزمایش ۷۲
- شکل ۴-۱۲ دستگاه آزمایش در حال تست نمونه ۷۲
- شکل ۴-۱۳ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۲ با طول‌های پیوستگی، پوشش بتن و درصد نانوسیلیس متفاوت ۸۶
- شکل ۴-۱۴ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با طول‌های پیوستگی، پوشش بتن و درصد نانوسیلیس متفاوت ۸۶
- شکل ۴-۱۵ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۲ با درصد نانوسیلیس متفاوت ۸۷
- شکل ۴-۱۶ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با درصد نانوسیلیس متفاوت ۸۸
- شکل ۴-۱۷ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۲ و ۱۴ ۸۸
- شکل ۴-۱۸ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با افزایش طول پیوستگی ۹۲
- شکل ۴-۱۹ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با افزایش پوشش آرماتور ۹۴
- شکل ۴-۲۰ ترسیم مقادیر $\frac{f_b}{u_{test}}$ در مقابل $\frac{c}{d_b}$ حاصل از آزمایش برای آرماتور شماره ۱۴ و بتن حاوی ۴/۵ درصد و ۶/۵ درصد نانوسیلیس ۹۸

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۲۷	جدول ۱-۲ طرح اختلاط های مختلف بتن فوق توانمند.....
۲۷	جدول ۲-۲ دو طرح اختلاط ارائه شده توسط فلهینگ و لتبیچر.....
۲۸	جدول ۳-۲ نسبت های اختلاط بتن پودری استفاده شده توسط چان و چو.....
۲۸	جدول ۴-۲ طرح اختلاط بتن پودری استفاده شده توسط گرایبیل.....
۲۹	جدول ۵-۲ طرح اختلاط های UHPC استفاده شده توسط جیانزین و اسپنیدر.....
۲۹	جدول ۶-۲ تاثیر زمان لرزاندن UHPC بر مقاومت فشاری.....
۳۰	جدول ۷-۲ طرح اختلاط ارائه شده توسط روسی.....
۳۶	جدول ۸-۲ مقایسه بتن فوق توانمند و بتن توانمند.....
۵۷	جدول ۱-۳ مشخصات نمونه ها.....
۶۱	جدول ۱-۴ طرح اختلاط بتن فوق توانمند مورد استفاده در آزمایشات.....
۶۱	جدول ۲-۴ ترکیب شیمیایی میکروسیلیس و نانوسیلیس.....
۶۷	جدول ۳-۴ نتایج آزمایشات مقاومت فشاری برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ و ۱۸۰ روز.....
۷۳	جدول ۴-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس.....
۷۴	جدول ۵-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس.....
۷۵	جدول ۶-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس.....
۷۵	جدول ۷-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس.....
۷۶	جدول ۸-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۲/۵ درصد نانوسیلیس.....
۷۶	جدول ۹-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس.....
۷۷	جدول ۱۰-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند بدون نانو سیلیس.....
۷۷	جدول ۱۱-۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند بدون نانو سیلیس.....

- جدول ۴-۱۲ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس ۷۸
- جدول ۴-۱۳ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس ۷۹
- جدول ۴-۱۴ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۴/۵ درصد نانوسیلیس ۸۰
- جدول ۴-۱۵ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس ۸۱
- جدول ۴-۱۶ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس ۸۲
- جدول ۴-۱۷ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس ۸۳
- جدول ۴-۱۸ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند بدون نانوسیلیس ۸۴
- جدول ۴-۱۹ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند بدون نانوسیلیس ۸۵
- جدول ۴-۲۰ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی ۹۰
- جدول ۴-۲۱ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی ۹۱
- جدول ۴-۲۲ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی ۹۲
- جدول ۴-۲۳ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی ۹۳
- جدول ۴-۲۴ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس ۹۵
- جدول ۴-۲۵ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق‌توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس ۹۶

فصل اول:

تعريف مساله و اهداف تحقيق

تکنولوژی و نوآوری در صنعت بتن، که به منظور دستیابی به یک محصول برتر در حال پیشرفت است، بخش چشمگیری از این پژوهش‌ها، با هدف دستیابی به بتن با مقاومت بیشتر و خصوصیات مکانیکی بهبود یافته، بررسی و تقویت مشخصات مکانیکی مصالح اولیه متمرکز شده است. برای اطمینان از رفتار غیر ترد به وسیله الیاف مسلح شده و دارای حجم ملات بالا با دانه‌بندی ویژه باشد. به علاوه بتن فوق‌توانمند نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایینی دارد و میزان روانی آن برای کارا بودن بتن بایستی با فوق‌روان‌کننده تامین شود. بتن فوق‌توانمند تقریباً غیر قابل نفوذ است و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر را نداشته باشد. همچنین ضعف عمده بتن، یعنی مقاومت کششی پایین را تا حد زیادی مرتفع نموده است. در بتن‌های پیش‌تنیده با استفاده از بتن فوق‌توانمند می‌توان نیروی پیش‌تنیدگی را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. با این عمل، اجرای دهانه‌های بسیار بزرگ، خصوصاً برای پل‌ها امکان‌پذیر شده است. در این پایان‌نامه با توجه به جدید بودن موضوع تنش پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی سعی بر آن است تا با انجام آزمایش بیرون‌کشیدگی براساس استاندارد RILEM به بررسی آزمایشگاهی تنش پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی بپردازیم.

۱-۲ هدف تحقیق

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص پیوستگی آرماتور و بتن‌های مختلف از جمله: بتن معمولی، بتن با مقاومت بالا و بتن پودری انجام شده است. اگرچه با توجه به خصوصیات منحصر به فرد بتن فوق‌توانمند امکان استفاده از آن در کاربردهای مختلف همچون سازه‌های پیش‌ساخته وجود دارد، تحقیقات اندکی در زمینه پیوستگی میان بتن فوق‌توانمند و آرماتور صورت گرفته است. در انجام این پژوهش تاثیر پارامترهای مختلف همچون مقاومت بتن، قطر آرماتور، طول پیوستگی و پوشش بتن بر

پیوستگی موضعی بتن فوق توانمند و آرماتور فولادی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت روابط تنش پیوستگی بتن فوق توانمند و آرماتورهای فولادی با مقاومت بیشتر از ۱۱۰ مگاپاسکال اصلاح گردید.

۳-۱ بیان مساله

بتن فوق توانمند (UHPC)^۱ دسته جدیدی از بتن است که در سال‌های اخیر با رشد تکنیک‌های تولید مواد سیمانی ریز توسعه یافته است. حداکثر اندازه دانه‌ها در بتن فوق توانمند ۶۰۰ میکرومتر می‌باشد. مقاومت فشاری بتن فوق توانمند بیشتر از ۱۱۰ مگا پاسکال^۲ است و مقاومت خمشی آن حداکثر تا ۵۰ مگا پاسکال می‌رسد. این نوع بتن به دلیل تخلخل و موینگی کم، تقریباً غیر قابل نفوذ است و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر را نداشته باشد. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بتن فوق توانمند نیاز این ماده به عمل‌آوری حرارتی است. براساس گزارشات ارائه شده عمل‌آوری حرارتی خصوصیات مکانیکی بتن را حداقل به میزان ۱۵٪ بهبود می‌دهد (فوآ و همکاران^۳ (۲۰۱۶)). مقاومت پیوستگی آرماتورهای بتن ناشی از سه مکانیزم چسبندگی شیمیایی، پیوستگی برشی و پایداری اصطکاکی (قفل و بست مکانیکی) بین بتن و آرماتور است. هنگامی که آرماتور دچار تغییر شکل محوری می‌شود، اولین عامل ایجادکننده پیوستگی بین آرماتور و بتن، چسبندگی شیمیایی بین سطح آرماتور و بتن چسبیده به آن است که به‌طور عمده وابسته به جنس و ترکیب شیمیایی آرماتور و بتن و نیز مشخصات هندسی سطح آرماتور است. با افزایش تغییر شکل، تنش پیوستگی برشی در بتن اطراف آرماتور ایجاد می‌شود که به‌شدت وابسته به مشخصات سطح آرماتور است. با رسیدن تنش پیوستگی به حد مقاومت پیوستگی، لغزش موضعی اتفاق می‌افتد. در آرماتورها با سطح صاف (آرماتورهای ساده)، بسته به میزان مقاومت اصطکاکی آرماتورها، لغزش به سمت خارج اتفاق می‌افتد و

¹ Ultra High performance Concrete

² Allena, S. Voo, Y.L and Foster, S.J

³ Pyoa S. et. al.

در نتیجه شکست از نوع لغزش خواهد بود. در این نوع آرماتورها مکانیزم اصطکاکی فعال نمی‌شود و مقدار تنش برشی قابل تحمل توسط بتن، ظرفیت مقاومت پیوستگی را مشخص می‌نماید. در آرماتورهای با سطح غیرصاف (آرماتورهای آجدار)، پس از ایجاد لغزش، به دلیل هندسه سطح آرماتور، عموماً چفت و بست مکانیکی بین بتن و آج‌های آرماتور سبب بالا رفتن مقاومت پیوستگی می‌گردد. در این نوع آرماتورها، شکست نهایی پیوستگی با خرد شدن بتن اطراف آرماتور به صورت استوانه‌ای رخ می‌دهد. در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی برشی آرماتور آجدار با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بیشترین مقاومت پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های آرماتور و بتن بین آنها انجام می‌شود، در نتیجه در محل تماس آج آرماتور و بتن، تنش فشاری ایجاد می‌شود که در اثر آن در مقطع عرضی بتن اطراف آرماتور تنش‌های حلقوی کششی و در کلیدهای بتن بین آج‌ها تنش برشی تولید می‌شود.

از معروف‌ترین آزمایش‌های تنش پیوستگی می‌توان به آزمایش بیرون کشیدگی که از قدیمی‌ترین، ساده‌ترین، ارزان‌ترین و کم‌زمان‌برترین روش برای تعیین تنش پیوستگی است اشاره کرد. در این آزمایش آرماتور در یک نمونه بتنی به شکل استوانه یا مکعب قرار داده می‌شود و سپس در حالی که بتن در جای خود ثابت نگه داشته شده است، آرماتور به سمت خارج کشیده می‌شود. از آنجاکه آرماتور تحت کشش قرار دارد و بتن تحت فشار، کرنش نسبی به وجود آمده سبب ایجاد لغزش نسبی می‌گردد (فروغی و همکارانش^۱ (۲۰۰۸)).

همانطور که اشاره شد با توجه به انجام آزمایشات بسیار کم در زمینه بررسی پیوستگی آرماتور و بتن فوق‌توانمند در این تحقیق، به بررسی اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی، شامل آرماتور شماره ۱۲ و آرماتور شماره ۱۴ با طول پیوستگی و پوشش

¹ Foroughi-Asl, A. et.al.

بتن برابر d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ می‌پردازیم و در نهایت به بررسی و اصلاح روابط تنش پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی بپردازیم.

۴-۱ روش انجام تحقیق

در این پژوهش در نظر است تا پیوستگی بین بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی بررسی شود. برای این منظور تعدادی آزمایش، براساس استاندارد RILEM ساخته شد. از آزمایش‌های انجام شده برای بررسی پارامترهای مختلف همچون: طول پیوستگی، قطر آرماتور، مقاومت بتن و مقایسه نمودارهای تنش پیوستگی - لغزش انتهای آزاد آرماتور استفاده می‌شود.

۵-۱ ساختار پایان نامه

این پایان‌نامه در ۵ فصل تنظیم گردیده است. در فصل اول پس از بیان مساله، هدف از انتخاب موضوع و انجام تحقیق مزبور، با توجه به نقاط ضعف و زمینه‌های مورد نیاز برای تحقیقات بیشتر ارائه می‌گردد. از طرفی تعریف موضوع پایان‌نامه و روش انجام تحقیق نیز پس از آن به صورت اجمالی توضیح داده می‌شود. در مورد بتن فوق‌توانمند و نانوسیلیس در فصل دوم به آن پرداخته می‌شود. در فصل سوم، مروری بر پیشینه تحقیق، آزمایش‌های پیوستگی بتن و آرماتورهای فولادی خواهیم داشت.

در فصل چهارم خلاصه و جمع‌بندی نتایج تحقیق حاضر بیان می‌شود و در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای انجام تحقیقات آتی و بیشتر ارائه می‌گردد.

فصل دوم: بتن فوق توانمند

اولین کاربرد صنعتی بتن فوق توانمند تحت عنوان نام تجاری D.S.P در صنایع دفاعی دانمارک برای پروژه‌های خاص و به صورت سری بود. در سال ۱۹۹۷ اولین سازه با استفاده از بتن فوق توانمند در کبک کانادا ساخته شد. این سازه یک پل عابر پیاده با دهانه ۷۰ متر و به صورت یک خرپای فضایی پیش‌تنیده بود. در سال ۱۹۹۷ استفاده از بتن فوق توانمند، در یک پروژه در فرانسه تأییدی بر دوام بسیار خوب این بتن شد. در نیروگاه کاتنوم^۱ فرانسه تیرهای فلزی برج‌های خنک کننده با تیرهای بتنی ساخته شده از بتن فوق توانمند جایگزین شدند. پس از سه سال یک گروه تخصصی از AFGC^۲ تیرهای مذکور را در محل نیروگاه بازبینی نمودند که هیچ‌گونه اثر خرابی بر روی تیرهای بتن فوق توانمند مشاهده نشد. علاوه بر این موارد، پروژه‌های دیگری نیز در کشورهای کره جنوبی، ژاپن، فرانسه و آلمان با استفاده از بتن فوق توانمند ساخته شده است. بتن فوق توانمند، دارای توانمندی زیادی برای ایجاد نقاط اتصال سازه‌ای در ساخت پل‌ها می‌باشد. در صورتی که این ماده برای نقاط اتصال بکارگیری شود، طول مهاری (وصله) آرماتورها به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد. اما قبل از به کار بردن بتن فوق توانمند در این گونه موارد، باید قابلیت پیوستگی آن با آرماتور مورد مطالعه قرار گیرد. پیوستگی بین بتن و آرماتور یکی از مهم‌ترین مسائل در مقاومت سازه‌های بتن‌آرمه است. کارآیی یک عضو بتن مسلح به مقاومت پیوستگی کافی بین بتن و آرماتور بستگی دارد.

۲-۲ بتن فوق توانمند^۳ و بتن فوق توانمند الیافی^۴

صنعت بتن به طور دائم برای تولید مواد با توانمندی بالا در حال پیشرفت بوده است. در این زمینه بیشتر تلاش‌ها بر حداکثر کردن حد نهایی مقاومت مواد با پایه سیمانی و همین‌طور دوام آن‌ها

¹ Cattenom

² Association Francaise de Genie Civil

³ Ultra-High Performance Concrete

⁴ Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete

متمرکز شده است. نتیجه این تلاش‌ها به وجود آمدن دسته‌ای از مواد با پایه سیمانی پرتلند می‌باشد که به بتن فوق‌توانمند معروف است. بتن فوق‌توانمند دسته جدیدی از انواع بتن‌هاست که در سال‌های اخیر گسترش یافته است و در مقایسه با بتن توانمند، بتن فوق‌توانمند ویژگی‌های منحصر به فردی از قبیل مقاومت بسیار بالا، دوام و پایداری دراز مدت بیشتری را دارا است. حداکثر اندازه دانه‌ها در بتن فوق‌توانمند، ۶۰۰ میکرومتر می‌باشد. مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند بیشتر از ۱۱۰ مگاپاسکال است و مقاومت خمشی آن حداکثر تا ۵۰ مگاپاسکال می‌رسد. بتن فوق‌توانمند به عنوان یک ماده نسبتاً جدید توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. قبل از به کار بردن بتن فوق‌توانمند باید قابلیت پیوستگی این ماده با آرماتور مورد مطالعه قرار گیرد. در صورت در دسترس قرار گرفتن اطلاعات کافی درباره پیوستگی و سایر خصوصیات بتن فوق‌توانمند، می‌توان از این ماده در کاربری‌های مختلف همانند تیرهای پل‌ها استفاده کرد. این بتن دارای توانمندی بسیار زیادی برای ایجاد مفاصل سازه‌ای ساده (نقاط اتصال سازه‌ای ساده) در ساخت پل‌ها، با کاهش طول مهاري فولاد مسلح‌کننده می‌باشد. بتن فوق‌توانمند یک گزینه بسیار مناسب برای ایجاد سازه‌های نازک مانند تکیه‌گاه‌های کم‌پهنا، تیرهای سازه‌های نازک و حائل‌هایی برای فشار بالا به شمار می‌رود. انعطاف‌پذیری و دوام بسیار بالای بتن فوق‌توانمند، این ماده را به یک جایگزین ایده‌آل برای سایر مصالح مانند فولاد تبدیل کرده است. بتن فوق‌توانمند دارای دوام بسیار بالایی است که از تخلخل و مویبندی پایین آن حاصل می‌شود. پایداری بسیار بالای آن در برابر یخ‌زدایی با نمک، آن را به عنوان یک گزینه مناسب برای استفاده در سطوحی که به‌طور متناوب در معرض یخ‌زدایی با نمک قرار می‌گیرند، معرفی نموده است. استفاده از بتن فوق‌توانمند، امکانات جدیدی را برای ساخت پل و ساختمان‌های بلند فراهم می‌کند. استفاده از این نوع مصالح دارای مزیت‌های اقتصادی مانند محافظت از آرماتور، کم کردن ابعاد مقطع و کاهش هزینه‌های جابجایی می‌باشد. علاوه بر این، مقاومت بالا و ظرفیت قابل توجه تحمل بار بتن فوق‌توانمند، کاربردهای جدیدی از آن برای قطعات پیش‌ساخته فراهم می‌کند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که می‌توان بتن فوق‌توانمند با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال را

بدون استفاده از عمل‌آوری حرارتی اضافه، به‌دست آورد. اما اگر این نوع بتن در درجه حرارت بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شود، افزایش بیشتری در مقاومت فشاری تا ۳۶۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی تا ۴۰ مگاپاسکال ملاحظه می‌گردد. شرط لازم برای دستیابی به این مقاومت تراکم مناسب دانه‌ها و نسبت آب به مواد سیمانی پایین است که این کار با استفاده از فوق روان‌کننده‌ها امکان‌پذیر است.

بتن پودری^۱، که بعدها منجر به ایجاد بتن فوق‌توانمند شد، با رشد تکنیک‌های ریزساخت در مواد سیمانی توسعه یافت. در مقایسه با مواد با پایه سیمانی معمولی، مزیت‌های اولیه بتن پودری شامل بهبود یکنواختی اندازه ذرات، تخلخل و ریزساخت‌ها می‌باشد. خصوصیات مکانیکی حاصل از بتن پودری عبارتند از: مقاومت فشاری بین ۲۰۰-۸۰۰ مگاپاسکال و کرنش کششی نهایی در حد ۱ درصد؛ این خصوصیات با استفاده از رویکرد مهندسی در ریزساخت‌ها شامل حذف دانه‌بندی‌های درشت، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، کاهش نسبت Ca(OH)_2 با معرفی اجزای پوزولانی و سهیم کردن الیاف فولادی مسلح‌کننده، حاصل می‌شود. بتن فوق‌توانمند الیافی، دسته جدید دیگری از بتن است که در سال‌های اخیر توسعه یافته است. در مقایسه با بتن توانمند این دارای رفتارهای فشاری، کششی و دوام بسیار بهتری می‌باشد. بتن فوق‌توانمند الیافی یک ماده سیمانی پیشرفته است که از جمله خصوصیات این ماده می‌توان به تراکم بالا و ماتریکس با مقاومت بالا که شامل تعداد زیاد الیاف فولادی فرورفته در آن است، اشاره کرد. همچنین این نوع بتن دارای خصوصیات مکانیکی استثنایی، شامل مقاومت کششی بسیار بالا، سخت‌شوندگی کرنشی و چگالی بالا که منجر به نفوذپذیری بسیار کم می‌گردد و آن را برای نوسازی و اصلاح سازه‌های موجود، ایده‌آل می‌سازد، می‌باشد. صرف‌نظر از رفتار کششی بتن فوق‌توانمند الیافی، این نوع بتن به گروهی از کامپوزیت‌های سیمانی

¹ Reactive Powder Concrete

مسلح شده الیافی با توانمندی بالا تعلق دارد که دارای مزیت‌های بیشتری از جمله ماتریکس بسیار متراکم با نفوذ پذیری کم می‌باشند.

۲-۳ مروری کوتاه بر کاربردهای بتن فوق توانمند

تحقیقات دانشمندان طی سه دهه اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی بتن با خواص فوق‌العاده گردیده که بسیاری از محدودیت‌های بتن معمولی را پشت سر گذاشته است. این بتن که ابتدا تحت عنوان بتن پودری و سپس با نام بتن فوق‌توانمند معرفی شد، دارای مقاومت فشاری بالاتر از ۱۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. این بتن تقریباً غیر قابل نفوذ بوده و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر را نداشته باشد. همچنین ضعف عمده بتن یعنی مقاومت کششی پایین را تا حد زیادی مرتفع نموده به طوری که در گونه‌ای از بتن فوق‌توانمند با استفاده از الیاف فولادی، دیگر نیازی به استفاده از آرماتور در بتن نمی‌باشد. در بتن‌های پیش‌تنیده با استفاده از بتن فوق‌توانمند می‌توان نیروی کششی پیش‌تنیدگی را به میزان قابل توجهی افزایش داد. از این طریق اجرای دهانه‌های بزرگتر، خصوصاً برای پل‌ها امکان‌پذیر شده است. افزایش اندازه دهانه‌ها به معنای کاهش تعداد پایه‌های مورد نیاز در پل‌ها است، که این مساله در مورد پل‌هایی که ترافیک از زیر آن‌ها عبور می‌کند، باعث افزایش ایمنی می‌گردد و در مورد پل‌هایی که بر روی رودخانه احداث می‌گردند، کاهش تعداد پایه‌ها، که در معرض جریان آب و خرابی‌های ناشی از آن قرار دارند، به معنای افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. برتری اصلی بتن فوق‌توانمند، بهبود دوام سازه‌های بتنی می‌باشد. گسترش استفاده از بتن در محیط‌های مختلف با شرایط متفاوت و وجود عوامل مهاجم محیطی نظیر سیکل‌های یخبندان، حمله سولفات‌ها، کلریدها و غیره باعث شده است که امروزه دوام نیز در کنار مقاومت فشاری بتن، یکی از پارامترهای اصلی طراحی در نظر گرفته شود. امروزه در کشورهای صنعتی، طراحی برای دوام در سازه‌های بتنی یک امر لازم و ضروری است و با توجه به لزوم حرکت

در جهت توسعه پایدار، این مساله در کشور ما نیز می‌بایست مدنظر قرار گیرد. دوام فوق‌العاده بتن فوق‌توانمند در برابر عوامل مختلف آن را به ماده‌ای ایده‌آل برای اجرای سازه‌های با طول عمر بالا تبدیل نموده است. در اوایل دهه ۸۰ میلادی، ایده استفاده از یک دانه‌بندی بسیار ریز به همراه یک ماتریکس همگن و توپر از مواد سیمانی ظهور پیدا کرد. این ایده از آنجا ظهور پیدا کرد که تحقیقات نشان دادند، ضعیف‌ترین ناحیه در بتن، در محل سنگ‌دانه‌های درشت (ناحیه انتقال) ایجاد می‌گردد، زیرا ترک از این نواحی شروع شده و پس از گسترش به نواحی دیگر، باعث گسیختگی بتن می‌شود. حال با حذف درشت‌دانه‌ها، در واقع این ضعف حذف می‌گردد و ریزترک‌های ناحیه انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن می‌شوند محدود خواهند شد. بتنی که براساس این ایده ساخته شد، به علت استفاده از مواد بسیار ریز (با حداکثر قطر ۰/۶ میلی‌متر)، بتن پودری نامیده شد. امروزه این بتن با توجه به خواص ویژه، بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا یا بتن فوق‌توانمند نامیده می‌شود.

اولین کاربرد صنعتی این بتن تحت نام تجاری D.S.P در صنایع دفاع دانمارک برای پروژه‌های خاص و به‌صورت سری بود. تحقیقات بعدی با هدف کاربردی کردن بتن فوق‌توانمند در صنعت ساختمان، در حدود سال ۱۹۸۴ آغاز شد. بعد از انجام تحقیقات اولیه در اوایل دهه ۹۰، بتن با عملکرد بالا با نام‌های تجاری مختلف توسط چند شرکت بزرگ در اروپا تولید گردید. معروف‌ترین آنها دو شرکت پیمانکاری بزرگ فرانسوی بودند که محصولات خود را تحت عنوان نام‌های تجاری BSI و Ductal معرفی نمودند. اولین سازه‌های ساخته شده از بتن فوق‌توانمند، شامل چندین پل عابر پیاده در کشورهای مختلف و دو پل ترافیکی در فرانسه و استرالیا و چند پروژه دیگر بودند که در ادامه به اختصار به آنها اشاره می‌شود. در سال ۱۹۹۷ اولین سازه با استفاده از بتن فوق‌توانمند در کبک کانادا ساخته شد. این سازه یک پل عابر پیاده با دهانه ۶۰ متری و به‌صورت خرپای فضایی پیش‌تنیده بود. استفاده از بتن فوق‌توانمند علاوه بر مزایای بسیار زیادی که داشت، به طراحان این پل اجازه داده بود تا از یک دال بتنی با ضخامت ۳۰ میلی‌متر برای رویه پل استفاده کنند. در واقع اجرای این پل بخشی

از یک برنامه تحقیقاتی برای مطالعه بر روی تغییرشکل‌ها و تنش‌ها در المان‌های پیش تنیده این پل، در دراز مدت انجام گرفت.

در سال ۱۹۹۷ استفاده از بتن فوق‌توانمند، در یک پروژه در فرانسه تاییدی بر دوام بسیار خوب این بتن شد. در نیروگاه کاتنوم^۱ فرانسه، شکل ۱-۲، تیرهای فلزی برج‌های خنک‌کننده با تیرهای ساخته شده از بتن فوق‌توانمند جایگزین شدند. محیط کاربرد این تیرها بسیار خورنده بود و بتن فوق‌توانمند به این دلیل انتخاب شد که کارشناسان انتظار داشتند، با توجه به دوام بسیار بالای بتن فوق‌توانمند، خرابی و در نتیجه هزینه‌های تعمیر و نگهداری این تیرها به حداقل ممکن برسد. پس از گذشت سه سال یک گروه تخصصی از انجمن مهندسان عمران فرانسه تیرهای مذکور را در محل نیروگاه بازبینی نمودند و هیچ‌گونه اثر خرابی بر روی تیرهای بتن فوق‌توانمند مشاهده نکردند.



شکل ۱-۲ نیروگاه اتمی کاتنوم در فرانسه

پروژه‌های دیگری نیز در کشورهای کره جنوبی، ژاپن، فرانسه و آلمان با استفاده از بتن فوق‌توانمند ساخته شده است. به عنوان مثال پل عابر پیاده صلح در کره جنوبی که یک پل قوسی با دهانه ۱۲۰ متر، ارتفاع قوس ۱۵ متر و ضخامت رویه پل بین ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین پل عابر

^۱ Cattenom

پیاده ساکاتا میراری^۱ در ژاپن، شکل ۲-۲، که یک پل صندوقه‌ای با جان مجوف می‌باشد که با استفاده از بتن فوق‌توانمند در سال ۲۰۰۲ ساخته شده است. جان مجوف این پل علاوه بر کاهش وزنی آن باعث زیبایی پل نیز شده است. پل عابر پیاده دیگری در فادیا^۲ فرانسه در سال ۲۰۰۲ با استفاده از بتن فوق‌توانمند ساخته شد که ویژگی اصلی آن مقاومت بسیار زیاد در برابر آتش بود. یکی دیگر پروژه‌هایی که با استفاده از بتن فوق‌توانمند ساخته شده است پل کارترنپلاتز^۳ در آلمان می‌باشد که در سال ۲۰۰۸ به اتمام رسیده است. موزه تمدن اروپا و خاورمیانه^۴ در فرانسه که در سال ۲۰۱۳ به بهره‌برداری رسید و پل کابلی بر روی رودخانه نیپیگون^۵ کانادا در سال ۲۰۱۶ می‌باشد.

اولین پل ترافیکی ساخته شده از بتن فوق‌توانمند پل بوری لسولنک^۶ در فرانسه بود که در سال ۲۰۰۱ به بهره‌برداری رسید. دهانه این پل حدود ۴۴ متر می‌باشد. همچنین، در استرالیا پل دیگری برای بهبود ترافیک به صورت چهار باند با دهانه ۱۶ متر با استفاده از بتن فوق‌توانمند ساخته شد. استفاده از بتن فوق‌توانمند در این پل باعث شد بار مرده به نصف کاهش یابد.

¹ Sakata-Mirari bridge

² Rhadia

³ Cartnerplatz bridge

⁴ Museum of European and Mediterranean Civilisations

⁵ Nipigon River Bridge

⁶ Boury Lesvelenc



شکل ۲-۲ پل عابر پیاده ساکاتا میراری^۱ در ژاپن

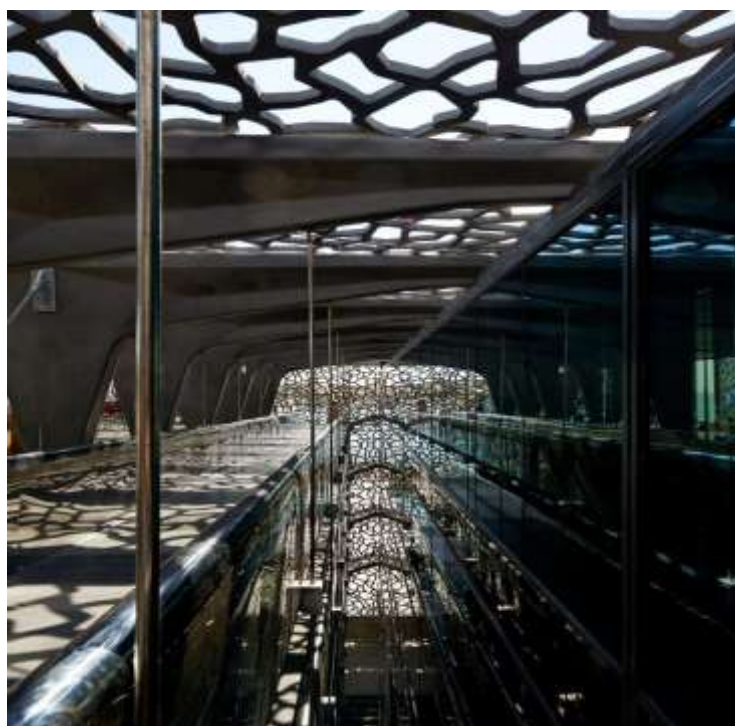


شکل ۲-۳ پل کابلی بر روی رودخانه نیپیگون در کانادا

¹ Sakata-Mirari bridge



شکل ۲-۴ موزه تمدن اروپا و خاورمیانه^۱، فرانسه



شکل ۲-۵ نمای داخلی موزه تمدن اروپا و خاورمیانه

^۱ Museum of European and Mediterranean Civilisations, Marseille, France

اولین کاربرد بتن فوق‌توانمند در ایالات متحده به سال ۲۰۰۱ بر می‌گردد. در آن سال از این ماده برای ساخت سقف سیلوی کلینکر در جوپو ایالت ایلینویز استفاده شد. آنها با کمک این ماده بیست و چهار قطعه دوزنقه‌ای شکل با ضخامت ۱۳۰ میلی‌متر و قطر ۱۷/۵ متر را پوشش دادند. استفاده از بتن فوق‌توانمند باعث کاهش نیروی انسانی و زمان لازم برای اجرا گردید و سقف این سیلو سریع‌تر و با نیروی کار کمتر از دو سیلوی دیگر که با کمک فلز پوشش داده شده بودند، ساخته شد. یک نمونه دیگر از کاربرد بتن فوق‌توانمند در صنعت سیمان در آمریکا، ساخت ستون‌های بارگیری خانه سیمان در دترویت می‌باشد که باعث شده از ستون‌های با سطح مقطع کوچکتر استفاده شود و در نتیجه فضای بیشتری برای کامیون‌های حمل سیمان ایجاد گردد. در ساختمان لانورن تاین^۱ واقع در مونترآل که در سال ۱۹۸۴ ساخته شد، از بتن توانمند با مقاومت ۱۰۶ مگاپاسکال استفاده شد. در ساختمان Two Union Square Building واقع در سیاتل آمریکا، که در سال ۱۹۸۸ ساخته شد نیز از بتن توانمند با مقاومت ۱۴۵ مگاپاسکال استفاده شد. بدون تردید رشد مقاومت بتن فوق‌توانمند به میزان ۲۰۰ مگاپاسکال یک قدم رو به جلوی دیگر در صنعت ساختمان است.

آزمایشات متعدد، توانمندی بتن فوق‌توانمند را در آزمایشگاه‌های مختلف تایید کرده‌اند. این بتن از خود مقاومت و دوام زیادی نشان می‌دهد. از نقطه نظر تئوری می‌توان در کاربردهای روزمره که در آنها مقاومت و دوام بالا مورد نیاز است، از این مواد استفاده نمود. اصل کلی در کاربرد این نوع بتن آن است که از دانه‌بندی‌های محکم‌تر، میکروسیلیس و عوامل کاهنده آب برای بالابردن مقاومت، از الیاف فولادی برای جلوگیری از شکست ترد و از الیاف پلی‌پروپیلن برای افزایش پایداری در برابر آتش‌سوزی استفاده گردد. عموماً با عمل‌آوری در شرایط بخار می‌توان به مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال و بیشتر نیز دسترسی پیدا کرد و بتن حاصل می‌تواند معیارهای ارائه شده در FHWA برای بتن توانمند را برآورده سازد. مصالح مورد نیاز برای بتن فوق‌توانمند در دسترس می‌باشد اما مشکل عمده در

¹ Lanuren Tienne

کاربرد آن، قیمت و سختی استفاده از این مصالح است. چندین سال قبل امکان ساخت بتن با مقاومت ۷۰۰ مگاپاسکال در آزمایشگاه برای محققان فراهم شد. اما تولید مجدد آن در کارگاه مشکل بود. با این وجود، پل عابر پیاده شبروک^۱ در کانادا، پل عابر پیاده سینیو^۲ در کره نمونه‌هایی از سازه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند هستند. همچنین تعدادی سازه آزمایشی با استفاده از بتن فوق توانمند برای پل‌های بزرگراه‌ها در ایالت متحده ساخته شد. این نمونه‌ها عمدتاً تیرهای پیش‌ساخته مورد استفاده در عرشه این پل‌ها بودند. در بسیاری از سازه‌ها وجود یک ماده با مقاومت بسیار بالا، مانند بتن فوق توانمند می‌تواند بسیار مفید باشد. به‌عنوان مثال در پل‌های کابلی، کمانش مشکلی ایجاد نمی‌کند و نیروی برشی موجود در آنها نسبتاً کوچک است. استفاده از بتن فوق توانمند در این پل‌ها می‌تواند موجب صرفه‌جویی در کابل‌ها و فونداسیون‌ها و در نتیجه سبب ایجاد روبناهای سبک‌تر گردد. از آنجا که عرشه پل معلق یک عضو خمشی است و در آن ظرفیت‌های کششی و فشاری به یک اندازه مهم است، استفاده از سازه‌های پیش‌تنیده در آنها ترجیح داده می‌شود. برای بهبود ظرفیت کششی و برشی بتن فوق توانمند می‌توان در ساخت آن از الیاف کربن استفاده کرد؛ به‌طوری که الیاف کربنی می‌تواند در برابر کل کشش پایداری کند و یا اگر بتوان از الیاف کربنی به عنوان یک قالب برای بتن فوق توانمند استفاده کرد، امکان ساخت تیرهای بسیار سبک و قوی ایجاد می‌شود. به علت دوام بسیار بالای بتن فوق توانمند از آن می‌توان برای ساخت یک پوسته برای شمع‌های بتنی پیش ساخته با قطر زیاد استفاده کرد.

۲-۴ آینده بتن فوق توانمند

با توجه به این که کارایی و هزینه، دو پارامتر مهمی هستند که کاربری یک محصول را تحت تاثیر قرار می‌دهند، آینده بتن فوق توانمند به چگونگی تامین این دو پارامتر بستگی دارد. علاوه بر کارایی،

¹ Sherbrooke bridge

² Seonyu bridge

قابل قبول بودن یک ماده، تحت اثر هزینه آن قرار دارد. منطقاً در صورت پایین بودن هزینه یک ماده، استفاده از آن بیشتر خواهد بود. به عنوان مثال، ایجاد کوره‌های باز ذوب آهن در دهه ۱۸۵۰، امکان تولید فولاد به مقدار زیاد را فراهم کرد و در نتیجه قیمت آن اقتصادی شد و استفاده از آن به‌طور وسیع شروع به رشد کرد. استفاده از بتن فوق‌توانمند نیاز به طی روند مشابهی دارد تا استفاده از آن را برای کاربردهای عمومی قابل قبول نماید. در حال حاضر هزینه زیاد مصالح یکی از موانع اصلی است که مانع گسترده‌گی استفاده از آن می‌شود. از طرف دیگر، اگر بتن فوق‌توانمند را یک نوع بتن در نظر بگیریم، باید قادر باشد مشابه بتن رفتار کند که این انتظار، یکی از محدودیت‌های دیگر در کاربرد عملی بتن فوق‌توانمند است. در درجه اول، اجرای بتن فوق‌توانمند نیازمند به توجه بیشتر و تجهیزات ویژه‌ای برای اطمینان از کیفیت است. از طرفی برای سازه‌های امروزی به چنین مقاومت بالایی نیاز نیست زیرا تمام اعضای سازه‌های بتنی برای اجرایی بودن می‌بایست حداقل ابعاد معینی را تامین کنند؛ در نتیجه برای استفاده کامل از ظرفیت بتن فوق‌توانمند باید کاربری‌های جدیدی برای آن ایجاد شود؛ زیرا اگر از این بتن در سازه‌های با فرم فعلی استفاده گردد، به مقاومت خیلی زیاد بتن فوق‌توانمند نیاز نخواهد بود. همانطور که پیش از این اشاره شد، فرم‌های جدید سازه‌ای با ارائه مواد جدید، توسعه یافته است. بنابراین لازم است فرم‌های سازه‌ای بهینه و مناسب برای بتن فوق‌توانمند، خارج از محدوده فعلی فرم‌های سازه‌ای، جستجو شود تا بتوان کاربری‌های جدیدی برای این نوع بتن ارائه کرد به‌طوری که از تمام قابلیت‌های آن حداکثر استفاده شده باشد.

۲-۵ تاریخچه تحقیقات درباره بتن فوق‌توانمند

کارایی زیاد بتن فوق‌توانمند با حداکثر کردن تراکم آن با استفاده از مواد معدنی بسیار ریز، پودر کوارتز و میکروسیلیس و با افزایش شکل‌پذیری آن با استفاده از الیاف مسلح‌کننده بهینه، حاصل می‌شود. یکی از خصوصیات بارز بتن فوق‌توانمند، حجم بالای میکروسیلیس، در برابر نسبت آب به سیمان بسیار پایین آن می‌باشد. در ساخت این بتن باید میزان تراکم و رفتار حرارتی به‌منظور

دستیابی به خصوصیات مکانیکی و دوام بهتر، بهینه شود. میکروسیلیس به کار رفته در بتن فوق‌توانمند دارای سه نقش متفاوت در این ترکیب می‌باشد، پر کردن فضای خالی بین اجزای بزرگتر مانند سیمان، افزایش روانی با کمک اثر روغن‌کاری حاصل از کرویت کانل اجزای اصلی و ایجاد هیدراتاسیون ثانویه به وسیله عکس‌العمل پوزولانی به همراه چسبندگی حاصل از هیدروآسیون اولیه (ACI 440.2R-02) و (ریچارد و چیریژی (۱۹۹۵)).^۱

استفاده از مقادیر زیاد سیمان علاوه بر اینکه سبب افزایش هزینه می‌گردد، بر حرارت هیدراتاسیون تاثیر منفی دارد و می‌تواند سبب بروز مشکل جمع‌شدگی گردد. پیشنهاد شده است برای غلبه بر مشکلات ناشی از سیمان زیاد از افزودنی‌های معدنی مناسب استفاده گردد. خاکستر بادی و سرباره‌های آهن‌گدازی، افزودنی‌های معدنی بسیار سودمند در ساخت بتن به شمار می‌روند. سهمیم کردن افزودنی‌های معدنی در ساخت بتن می‌تواند به‌طور موثری سبب افزایش دوام بتن گردد.

ترتین و کورپا^۲ استفاده از سیلیس کلوئیدی مصنوعی را در ساخت بتن توانمند و بتن فوق‌توانمند مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی خاطر نشان می‌کنند، استفاده از سیلیس کلوئیدی به همراه خاکستر بادی مزیت بیشتری نسبت به میکروسیلیس دارد. همچنین بوریز و روگیو^۳ از اجزای پوزولانی دیگری مانند خاکستر بادی، پرکننده‌های ریزسنگ آهکی یا افزودنی‌های آلومیناسلیکات در ساخت بتن فوق‌توانمند استفاده کردند.

گرایبیل^۴ برای ساخت نمونه‌های بتن فوق‌توانمند علاوه بر مصرف میکروسیلیس بالا، از حجم سیمان زیادی نیز استفاده کردند. این بتن دارای نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۲ بود و در آن از

¹ Richard, p., Cheyrezy, M.

² Trettin & Korpa

³ Borys & Rougeau

⁴ Graybeal

افزودنی‌های کاهنده آب (بر پایه پلی کربوکسیلات) برای دستیابی به کارایی قابل قبول استفاده شد. این بتن دارای دانه‌های زبر و درشت نبود و توسط فیبرهای فولادی بلند مستقیم با طول ۱۳ میلی‌متر که در حدود ۲ درصد حجم بتن را اشغال می‌کردند، مسلح شده بود. مطالعات متعددی در رابطه با ترکیب، مشخصات مکانیکی و دوام بتن فوق‌توانمند وجود دارد (فهلینگ^۱ و همکاران (۲۰۰۴)) و (درول^۲ (۲۰۰۴)).

یازیکی^۳ تاثیر شرایط عمل‌آوری و افزودنی‌های معدنی با حجم زیاد را بر خصوصیات مکانیکی ترکیبات مختلف بتن فوق‌توانمند مورد بررسی قرار داد. در این نمونه‌ها سیمان با استفاده از خاکستر بادی با نسبت‌های مختلف جایگزین شد. همچنین از میکروسیلیس و پودر کوارتز با خصوصیات معین و ثابت در تمام ترکیب‌ها استفاده شد. در این نمونه‌ها سیمان و میکروسیلیس نقش چسباننده را ایفا می‌کردند، به‌علاوه از بازالت و کوارتز با حداکثر اندازه به‌ترتیب ۴ و ۰/۱ میلی‌متر نیز استفاده شد.

۲-۶ اجزای تشکیل‌دهنده بتن فوق‌توانمند

در این بخش طرح اختلاط، روند اختلاط و عملکرد حرارتی مورد نیاز برای ساخت بتن فوق‌توانمند، به‌منظور رساندن این ماده به حداکثر قابلیت‌های مقاومتی آن، بررسی می‌شود. اجزای تشکیل‌دهنده بتن فوق‌توانمند عبارتند از: سیمان پرتلند، میکروسیلیس، پودر کوارتز (گرد کوارتز نیز نامیده می‌شود)، شن کوارتز، فوق‌روان‌کننده، آب و الیاف. از آنجا که هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده بتن فوق‌توانمند، در بهینه‌کردن ویژگی‌های این نوع بتن موثرند، در ادامه به بررسی اثر هر یک از این مصالح پرداخته می‌شود.

¹ Fehling, E.

² Droll K.

³ Yazici

۲-۶-۱ سیمان پرتلند

سیمان پرتلند چسباننده‌ای است که مصالح تشکیل دهنده بتن فوق‌توانمند را به یکدیگر می‌چسبانند. سیمان پرتلند عملاً مانع به حداقل رساندن تخلخل می‌گردد زیرا هنگامی که آب اضافه می‌شود، تخلخل داخلی سیمان افزایش می‌یابد. به‌همین دلیل در برخی موارد برای بالا بردن چگالی و کاهش تخلخل در بتن فوق‌توانمند نیاز به اعمال فشار برای عمل‌آوری بتن وجود دارد. اندازه دانه‌های موجود در سیمان دارای قطر میانگین تقریبی ۰/۰۱۵ میلی‌متر (۱۵ میکرومتر) هستند.

۲-۶-۲ میکروسیلیس

چگالی بتن با استفاده از ذرات ریزدانه که به خوبی در سرتاسر ماتریکس قرار می‌گیرند، افزایش می‌یابد. ذرات کروی برای به حداکثر رساندن تراکم مخلوط، دارای مشکل هستند در نتیجه عمدتاً از مواد کروی در بتن استفاده نمی‌شود. محققان این مشکل را با استفاده از میکروسیلیس به‌عنوان یکی از اجزای بتن فوق‌توانمند، برطرف کردند. میکروسیلیس ریزترین جز به‌کار برده شده در بتن فوق‌توانمند است که قطر آن به اندازه‌ای کوچک است که فضای خالی بین سیمان و پودر کوارتز را پر می‌کند. همچنین، به‌دلیل شکل کروی میکروسیلیس، روی هم حرکت کردن مواد بهبود یافته و در نتیجه پروسه اختلاط راحت‌تر انجام می‌شود. اجزای کروی میکروسیلیس منافذ میان اجزای بزرگتر را پر کرده و سبب افزایش تراکم می‌گردند؛ علاوه بر این، میکروسیلیس سبب افزایش کارایی مخلوط می‌گردد.

۲-۶-۳ پودر کوارتز

پودر کوارتز یا گرد کوارتز یکی از عناصر اصلی بتن پودری است که نام بتن پودری از آن ناشی می‌شود. پودر کوارتز کریستالی خرد شده یک عنصر حیاتی در اختلاط بتن پودری و بتن فوق‌توانمند به شمار می‌رود که ذرات آن دارای قطر میانگین ۰/۰۱ میلی‌متر (۱۰ میکرومتر) هستند. از جمله

مزایای استفاده از کوارتز می‌توان به دسترسی آسان و ارزانی از آن اشاره کرد. این ماده یک ماده سخت است که خواص ماتریکس را بهبود می‌بخشد (سختی کوارتز ۷ و فرمول شیمیایی آن SiO_2 می‌باشد).

۲-۶-۴ شن کوارتز

استفاده از دانه‌بندی درشت در مخلوط بتن فوق‌توانمند توصیه نشده است، بنابراین شن کوارتز بزرگترین ذرات موجود در ماتریکس را تشکیل می‌دهد. اندازه ذرات شن براساس دستیابی به یک مخلوط همگن بهینه تعیین می‌شود. در بتن فوق‌توانمند، اندازه ذرات شن به $0/8$ میلی‌متر محدود می‌شود که البته از $0/15$ میلی‌متر کمتر نیست (ریچارد و چیریزی^۱ (۱۹۹۵)). در مرجع دیگری تاکید شده است که شن نرم با اندازه دانه‌های بین $0/15$ تا $0/6$ میلی‌متر، بزرگترین اندازه ذرات به کار رفته در بتن فوق‌توانمند را تشکیل می‌دهد (گرایبیل و تانیسی^۲ (۲۰۰۷)). این شن نرم از شن خرد شده‌ای که الک می‌شود به دست می‌آید که به آن، شن مصنوعی نیز گفته می‌شود. البته می‌توان شن با اندازه ذرات مورد نظر را از معدن شن طبیعی نیز به دست آورد. با توجه به این که شن طبیعی غالباً به شکل کروی است و به آب کمتری نیاز دارد، بنابراین نسبت به شن مصنوعی دارای مزیت است (ریچارد و چیریزی^۳ (۱۹۹۵)). شن کوارتز دارای مزایایی مانند سختی و دسترسی آسان می‌باشد.

۲-۶-۵ فوق روان‌کننده

یکی از خصوصیات منحصر به فرد بتن فوق‌توانمند آن است که در اختلاط آن از کمترین مقدار آب استفاده می‌شود، در نتیجه کارایی آن کاهش می‌یابد. این کاهش کارایی ناشی از به وجود آمدن تعداد

¹ Richard, p., Cheyrezy, M.

² Graybeal, B., Tanesi, J.

³ Richard, p., Cheyrezy, M.

زیادی بار الکتریکی اشباع نشده در سطح ذرات سیمان در نتیجه آسیاب کردن است (آیتسین^۱ و همکاران (۱۹۹۸)). هنگامی که این بارهای الکتریکی اشباع نشده در تماس با آب قرار گیرند، باعث لخته شدن اجزای سیمان می‌گردند که برای جلوگیری از لخته شدن به فوق‌روان کننده نیاز است. قاعدتاً به علت استفاده از حداقل مقدار آب در اختلاط، مقدار فوق‌روان کننده مورد نیاز افزایش می‌یابد.

۲-۶-۶ الیاف فلزی

انعطاف‌پذیری بتن فوق‌توانمند با اضافه کردن فولاد بهبود می‌یابد. بدون اضافه کردن فولاد، مقاومت حاصل از نیروهای یونی سبب شکننده شدن بتن حاصل می‌گردد که این شکنندگی سبب بروز مشکلاتی در کاربری‌های سازه‌ای می‌شود. استفاده از فولاد به دو صورت انجام می‌پذیرد. یک روش آن است که الیاف فولادی در هنگام اختلاط به بتن اضافه می‌شوند. در روش دیگر، فولاد درون بتن فوق‌توانمند جای داده می‌شود. در حال حاضر استفاده از الیاف در اختلاط ترجیح داده می‌شود زیرا ماده مرکب حاصله دارای صلبیت بتن و انعطاف‌پذیری فولاد می‌باشد. اندازه و شکل الیاف به مشخصات مکانیکی ماتریکس بستگی دارد. استفاده از الیاف فلزی می‌تواند تمرکز ترک‌های فعال را به تاخیر اندازد.

۲-۶-۷ الیاف پروپیلن

الیاف پروپیلن در نمونه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقاومت کششی و فشاری و خمشی آنها مانند کاربری‌های معماری بحرانی نباشد. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن فوق‌توانمند به‌طور چشمگیری خصوصیات مقاومتی بتن را بهبود نمی‌بخشد اما نفوذپذیری، ساییدگی و پایداری در برابر ضربه را بهبود می‌بخشد (توتانجی^۲ (۱۹۹۸)).

¹ Aitcin, P.C.

² Toutanji, H.

۷-۲ طرح اختلاط

طرح‌های اختلاط زیادی برای تهیه بتن فوق‌توانمند در مراجع مختلف وجود دارد. اگر چه محققان و سازندگان به دنبال نوآوری برای ارائه یک طرح اختلاط بهینه هستند، اجزای اصلی به‌کارگیری شده در طرح‌های اختلاط مشابه هستند. این اجزای اصلی عبارتند از: سیمان پرتلند، میکروسیلیس، پودر کوارتز، شن کوارتز، فوق‌روان‌کننده، آب و الیاف (فولاد و پروپیلن). درصد اختلاط اجزای به‌کارگیری شده در ساخت پل شبروک^۱ در جدول (۱-۲) ارائه شده است (بلیس و کوچر^۲ (۱۹۹۹)) و (بونو^۳ و همکاران (۱۹۹۷)). با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که بخش اعظم مخلوط، از عناصر خشک ساخته شده و بخش کوچکی از آن شامل اجزای مرطوب، آب و فوق‌روان‌کننده است. این مسئله در اغلب طرح‌های اختلاط مربوط به بتن فوق‌توانمند به چشم می‌خورد.

در یک کار تحقیقاتی که توسط بونو و همکارانش انجام شد، مقایسه‌ای بین طرح‌های اختلاط مختلف صورت گرفت که اختلاط‌های به‌کار رفته در این تحقیق در جدول ۱-۲ ارائه شده‌اند. مشابه طرح‌های قبلی هر سه این طرح‌ها به درصد کمی مواد مایع نیاز دارند. اختلافات موجود در این سه طرح اختلاط سبب می‌شود که خصوصیات مکانیکی آن‌ها با یکدیگر متفاوت باشند.

طرح اختلاط دیگری که توسط موسسه HDR ارائه شده است نیز در جدول ۱-۲ آمده است. این طرح با سایر طرح‌ها این اختلاف را دارد که در آن پودر کوارتز از شن کوارتز جدا نیست. طرح اختلاط دیگری که توسط ریچارد و چیریزی^۴ ارائه شده نیز در جدول ۱-۲ ارائه شده است. آنها مقایسه‌ای بین بتن فوق‌توانمند دارای الیاف فولادی و بدون الیاف فولادی که دارای کوارتز خرد شده بودند، انجام دادند. همچنین در این مطالعه مقایسه‌ای نیز بین شرایط رفتار حرارتی مختلف ارائه شد.

¹ Sherbrooke bridge

² Blais, P., Couture, M.

³ Bonneau, O.

⁴ Richard & Cheyrezy

دو طرح اختلاط دیگر که توسط فهلینگ و لیتبچر^۱ مورد استفاده قرار گرفته است در جدول ۲-۲ ارائه شده است. در این پژوهش از دو طرح اختلاط استفاده شده است که مقاومت فشاری ۱۶۰ و ۱۹۰ مگاپاسکال به دست آمده است. توجه به این نکته ضروری است که اگر چه ترکیبها با یکدیگر متفاوت هستند، درصد اختلاط هر یک از مصالح تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند.

چان و چو^۲ برای ساخت بتن پودری از سیمان پرتلند تیپ II، شن کوارتز نرم (با اندازه تقریبی ۰/۳-۰/۸ میلی‌متر)، پودر کوارتز خرد شده (با اندازه تقریبی ۰/۰۵-۰/۰۲ میلی‌متر)، فوق روان‌کننده و الیاف فولادی کوتاه (به قطر ۰/۱۶ میلی‌متر و طول ۱۳ میلی‌متر و مقاومت کششی ۲۶۰۰ مگاپاسکال) استفاده کردند. نسبت‌های اختلاط به کارگیری شده در این برنامه آزمایشگاهی در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

گرایبیل^۳ برای بررسی خصوصیات بتن فوق‌توانمند، از نوعی بتن پودری که بنام تجاری داکتال^۴ شناسایی می‌شود، استفاده کرد. طرح اختلاط به کار رفته در این پژوهش، در جدول ۲-۴ ارائه شده است. جیانزین و اسچنیدر^۵ برای ساخت بتن فوق‌توانمند از شن کوارتز با اندازه ذرات ۰/۳-۰/۸ میلی‌متر به عنوان درشت‌دانه، سیمان پرتلند معمولی تیپ CEM I/425 به عنوان چسباننده، میکروسیلیس سفید به عنوان افزودنی پوزولانی بتن، پودر کوارتز با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر به عنوان پرکننده ریز و فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات با اندازه ذرات ۰/۲-۱ میکرومتر استفاده نمودند. آنها تاثیر شرایط مختلف عمل‌آوری و همچنین تغییر زمان تراکم را بر مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند مورد بررسی قرار دادند (جدول‌های ۲-۵ و ۲-۶).

¹ Fehling & Leutbecher

² Chan & Chu

³ Graybeal

⁴ Ductal

⁵ Jianxin & Schneider

جدول ۱-۲ طرح اختلاط های مختلف بتن فوق توانمند

اجزای بتن فوق توانمند	Sherbrooke Footbridge	Bonneau et al.			HDR	Richard & Chyreyz
		I	II	III		
سیمان (%)	۲۷/۶	۲۹/۵	۲۷/۹	۲۸/۰	۳۶/۹	۳۲/۲
میکروسیلیس (%)	۸/۹	۹/۶	۹/۰	۹/۱	۹/۳	۷/۴
پودر کواتز (%)	۸/۲	۸/۸	۸/۴	۸/۴	۰	۱۲/۶
شن (%)	۳۹/۴	۴۲/۳	۳۹/۷	۴۰/۲	۴۰/۶	۳۵/۴
الیاف فلزی (%)	۷/۴	۰	۵/۶	۵/۶	۶/۳	۵/۶
فوق روان کننده (%)	۰/۷	۱/۶	۱/۵	۱/۳	۱/۶	۰/۶
آب (%)	۷/۸	۸/۲	۷/۹	۷/۴	۵/۳	۶/۲

*درصد وزنی اجزا در هر مترمکعب

جدول ۲-۲ دو طرح اختلاط ارائه شده توسط فهلینگ و لتبیچر^۱

سیمان	ماسه ۰/۱۱۵-۰/۱۲۵ میلی‌متر	میکروسیلیس	پودر کواتز	مصالح ریزدانه کوچکتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر	آب	فوق روان کننده
۷۳۳	۱۰۰۸	۲۳۰	۱۸۳	۴۰۵	۱۶۱	۲۸/۶
۸۳۲	۹۷۵	۱۳۵	۲۰۷	۴۰۳	۱۶۶	۲۹/۴

*مقادیر ارائه شده جدول، برای آب و مصالح ریزدانه برحسب l/m^3 و برای سایر مواد بر حسب kg/m^3 می‌باشد.

¹ Fehling & Leutbecher

جدول ۲-۳ نسبت های اختلاط بتن پودری استفاده شده توسط چان و چو^۱

فوق روان کننده	آب	میکروسیلیس	پودر کوارتز	مصالح ریزدانه	سیمان تیپ II	درصد میکروسیلیس
۰/۰۱۹	۰/۳	۰	۰/۳۵	۱/۲۵	۱	۰
۰/۰۱۹	۰/۳	۰/۱	۰/۳۵	۱/۲۵	۱	۱۰
۰/۰۱۹	۰/۳	۰/۲	۰/۳۵	۱/۲۵	۱	۲۰
۰/۰۱۹	۰/۳	۰/۳	۰/۳۵	۱/۲۵	۱	۳۰
۰/۰۱۹	۰/۳	۰/۴	۰/۳۵	۱/۲۵	۱	۴۰

*مقادیر ارائه شده در جدول، درصد وزنی مصالح نسبت به سیمان می باشد.

جدول ۲-۴ طرح اختلاط بتن پودری استفاده شده توسط گرایبیل^۲

مصالح	مقدار kg/m^3	درصد وزنی
سیمان پرتلند	۷۱۰	۲۸/۵
مصالح ریزدانه	۱۰۲۰	۴۰/۸
میکروسیلیس	۲۳۰	۹/۳
شن کوارتز	۲۱۰	۸/۴
فوق روان کننده	۳۱	۱/۲
زودگیر کننده	۳۰	۱/۲
الیاف فولادی	۱۵۶	۶/۲
آب	۱۱۰	۴/۴

¹ Chan & Chu

² Graybeal

جدول ۲-۵ طرح اختلاط های UHPC استفاده شده توسط جیانزین و اسچنیدر^۱

شماره طرح	سیمان CEM I/425 (kg/m ³)	نسبت میکروسیلیس به سیمان	نسبت آب به سیمان	مقاومت فشاری	
				۲۸ روز در دمای ۲۰ درجه	۳ روز در دمای ۹۰ درجه و ۱۴ روز در دمای ۲۰ درجه
۱	۹۵۰	۲۵٪	۰/۱۸۷	۱۴۹/۲	۱۸۹/۷
۲	۸۹۳	۲۶/۶٪	۰/۱۹۹	۱۴۱/۶	۱۹۵/۵
۳	۸۳۶	۲۸/۴٪	۰/۲۱۳	۱۴۵/۹	۱۸۶/۳
۴	۷۷۹	۳۰/۵٪	۰/۲۲۹	۱۵۱/۱	۱۷۷/۵
۵	۷۲۲	۳۲/۹٪	۰/۲۴۷	۱۴۳/۰	۱۹۰/۱
۶	۶۶۵	۳۵/۷٪	۰/۲۶۸	۱۴۸/۱	۲۰۱/۷

جدول ۲-۶ تاثیر زمان لرزاندن UHPC بر مقاومت فشاری

سیمان CEM I/425 (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	پودر کوارتز (kg/m ³)	شن کوارتز (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	مقاومت فشاری (Mpa)		
						بدون ویبره	60s ویبره	>90s ویبره
۶۶۵	۲۰۰	۲۸۵	۱۰۲۰	۱۷۸	۲۳	۱۵۵/۵	۱۷۴/۳	۱۹۷/۰

¹ Jianxin & Schneider

طرح اختلاط دیگری که توسط روسی^۱ و سپس توسط هابل^۲ و همکاران استفاده شده، در جدول ۷-۲ ارائه شده است.

جدول ۷-۲ طرح اختلاط ارائه شده توسط روسی^۳

وزن	نوع	مصالح
۱۰۵۰	CEM I/525	سیمان
۷۳۰	<0.5mm	سنگ‌دانه
۲۷۵	سطح مخصوص $12m^2/gr$	میکروسیلیس
۴۷۰	طول 10mm و قطر 0.2mm	الیاف فولادی
۳۵	پلی کربوکسیلات	فوق روان کننده
۱۹۰	-	آب

۸-۲ روند اختلاط

روند اختلاط در بتن فوق توانمند نسبت به روند اختلاط در بتن معمولی طولانی تر است. برای اختلاط بتن فوق توانمند لازم است ترتیب مشخصی برای اضافه کردن عناصر و زمانی معین برای اختلاط اجزای به کار گرفته شود. به علاوه، برای تعیین مقدار دقیق هر عنصر به وسایل اندازه گیری با دقت مطلوب نیاز است؛ زیرا تغییر در مقدار هر یک از عناصر می تواند تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی این نوع بتن داشته باشد. آسان ترین روش برای تهیه و حمل بتن فوق توانمند استفاده از یک

¹ ROSSI

² Habbel

³ ROSSI

مخلوط کننده مرکزی در کارخانه است. با این حال مطالعات مختلف نشان می‌دهد که در صورت لزوم می‌توان از تراک میکسر استفاده کرد.

عموماً روندهای اختلاط در طرح‌های مختلف یکسان هستند. ابتدا پودرهای خشک تا زمانی که یک مخلوط همگن به دست آید، با یکدیگر مخلوط می‌شوند. این بخش می‌تواند چندین دقیقه به طول انجامد. سپس بخشی از آب و نیمی از فوق روان کننده به اختلاط اضافه می‌شود. مخلوط کردن تا زمانی ادامه می‌یابد که مایع کاملاً ترکیب شود. سپس باقیمانده آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه می‌شود. زمانی که مخلوط نسبتاً همگن شده باشد، الیاف اضافه می‌شود. زمانی که بتن فوق-توانمند برای اولین بار معرفی شد، تنها امکان تولید آن در شرایط آزمایشگاهی وجود داشت. مطالعاتی که پس از آن انجام گرفت، روند مخلوط کردن را تغییر داد و برای این نوع بتن شرایطی را فراهم کرد تا با روش‌هایی مشابه بتن سنتی تولید شود (ریچارد و چیریزی^۱ (۱۹۹۵)) و (بونویو^۲ و همکاران (۱۹۹۶)) و (بونویو^۳ و همکاران (۱۹۹۷)). این بدان معناست که به جای مخلوط کردن در مقیاس‌های بسیار کوچک در آزمایشگاه، می‌توان بتن فوق توانمند را در میکسر در کارخانه‌های بتن پیش ساخته یا در تراک میکسرهای مربوط به بتن آماده، تهیه کرد. چان و چو^۴ ابتدا اجزا و پودرها را به صورت خشک و به مدت سه دقیقه مخلوط، سپس نصف آب و فوق روان کننده را اضافه کردند و آن را به مدت ۵ دقیقه توسط میکسر مخلوط نمودند. سپس بقیه آب و فوق روان کننده را اضافه کردند. کل زمان اختلاط به این روش ۱۵ دقیقه به طول می‌انجامد.

گرایبیل^۵ نکات کلیدی در روند اختلاط را به صورت زیر عنوان کرده است:

¹ Richard, p., Cheyrezy, M.

² Bonneau, O.

³ Bonneau, O.

⁴ Chan & Chu

⁵ Graybeal

-تمام اجزای تشکیل دهنده وزن شوند. نصف فوق روان کننده به آب اضافه شود.

-مخلوط پیش آماده در مخلوط کن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شود.

-آب به آرامی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شود.

-یک دقیقه مکث و سپس باقی مانده فوق روان کننده به مخلوط در مدت ۳۰ ثانیه افزوده شود.

-مخلوط کردن تا زمانی که بتن فوق توانمند از حالت پودر خشک به یک ملات ضخیم تبدیل شود، ادامه پیدا کند. (زمان مورد نیاز برای این کار متغیر است).

-الیاف به آرامی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شود.

-پس از اضافه شدن الیاف، حرکت میکسر به مدت یک دقیقه ادامه پیدا کند تا از مخلوط شدن الیاف کاملاً اطمینان حاصل شود.

۹-۲ رفتار حرارتی

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بتن فوق توانمند نیاز این ماده به عمل‌آوری حرارتی است. این روند که گاهی به جای روند عمل‌آوری، روند رفتار حرارتی نامیده می‌شود، یک روند ساده است و در واقع یک مرحله اضافه در ساخت بتن است که به منظور قوی‌تر کردن ساختار آن از نظر میکروسکوپی انجام می‌گیرد. عمل‌آوری حرارتی برای تمام کاربری‌های بتن فوق توانمند مورد نیاز نیست زیرا بدون عمل‌آوری حرارتی نیز بتن فوق توانمند مقاومت و انعطاف‌پذیری قابل توجهی نسبت به بتن توانمند دارد. براساس گزارشات ارائه شده عمل‌آوری حرارتی خصوصیات مکانیکی بتن را حداقل به میزان ۱۵ درصد بهبود می‌دهد. همچنین در این گزارشات تاکید شده است که پس از عمل‌آوری حرارتی، دوام بتن افزایش و جمع‌شدگی و خزش بسیار کاهش می‌یابد. عمل‌آوری حرارتی با شتاب بخشیدن به

عملکرد پوزولانی میکروسیلیس و اصلاح ساختار هیدراته شدن، سبب بهبود در ریز ساخت بتن می‌گردد.

در روندهای پیشنهادی عمل‌آوری حرارتی بتن فوق‌توانمند، اختلافات اندکی وجود دارد. معمولی‌ترین روش انجام عمل‌آوری حرارتی آن است که نمونه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد تحت شرایط بسیار مرطوب قرار داده شود. این عمل‌آوری سبب می‌شود مقاومت فشاری به میزان ۶۰ تا ۷۰ درصد نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری نشده که دارای همان طرح اختلاط هستند، بیشتر شود (بونيو^۱ و همکاران (۱۹۹۷)). عمل‌آوری حرارتی بر روی پل عابر پیاده Sherbrooke، به این گونه صورت گرفت، که نمونه‌ها ۴۸ ساعت در حمام بخار در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند که در نتیجه این عمل مقاومت فشاری به ۲۰۰ مگاپاسکال رسید.

بونيو و همکاران خصوصیات مکانیکی و دوام بتنی را که به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته بود، مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های ساخته شده در این مطالعه از خود مقاومت فشاری در محدوده ۱۶۳-۲۱۷ مگاپاسکال نشان دادند.

استفاده از شرایط مرطوب برای عمل‌آوری، یک روش معمول است. اما از روش خشک نیز می‌توان استفاده کرد. خصوصیات مکانیکی بتن زمانی که از حرارت بدون رطوبت استفاده می‌شود، اندکی نسبت به زمانی که در محیط مرطوب عمل‌آوری حرارتی می‌شود، تضعیف می‌گردد. یکی از روش‌های معمول عمل‌آوری حرارتی آن است که از ترکیب عمل‌آوری با بخار و روش خشک استفاده شود.

در مطالعه‌ای که توسط چان و چو^۲ برای بررسی تاثیر میکروسیلیس بر پیوستگی الیاف فولادی در بتن‌های پودری انجام شد، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت قالب برداری و سپس به مدت سه روز در دمای

¹ Bonneau, O.

² Chan & Chu

۸۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۹۰ درصد عمل‌آوری شدند. پس از این عمل‌آوری، نمونه‌ها در محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰ درصد تا زمان آزمایش نگهداری شدند.

هیگر^۱ و همکاران تاثیر حرارت عمل‌آوری را بر خصوصیات مکانیکی بتن مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن و افزایش اندکی در مدول الاستیسیته بتن تحت اثر حرارت عمل‌آوری قابل دستیابی است. آنها همچنین عنوان کردند که در اثر عمل‌آوری حرارتی با دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری در حدود مقاومت فولاد قابل دستیابی است. مقاومت کششی بتن تحت تاثیر طول و حجم الیاف است و از حرارت عمل‌آوری مستقل است. مقایسه بین مدول الاستیسیته نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که عمل‌آوری حرارتی تاثیر اندکی بر مقدار مدول الاستیسیته دارد.

فهلینگ^۲ و همکاران نشان دادند، عمل‌آوری حرارتی می‌تواند رشد مقاومت فشاری را تسریع کند به طوری که در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد رشد قابل توجهی در مقاومت بتن حاصل می‌شود. زیرا درجه حرارت بالا علاوه بر این که عملیات هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کند، سبب بهبود در ریزساخت‌ها نیز می‌گردد. آنها نشان دادند، حتی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد که به مدت ۴۸ ساعت بر بتن اعمال شود، مقادیر مقاومت فشاری بیشتری نسبت به حالت نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید.

در مطالعه‌ای که توسط گرایبیل و تانسی^۳ در سال ۲۰۰۷ منتشر شد، نمونه‌های استوانه‌ای یک روز پس از بتن‌ریزی، قالب‌برداری می‌شدند. پس از قالب‌برداری دو روش عمل‌آوری بر روی نمونه‌ها اعمال شد. برخی از نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در یک محیط بخار (۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۹۵

¹ Hegger

² Fehling

³ Graybeal & Tanesi

درصد رطوبت) قرار می‌گرفتند. پس از این مرحله، نمونه‌ها در یک محیط آزمایشگاهی استاندارد (۲۲ درجه سانتی‌گراد و تغییرات رطوبت بین ۳۰ تا ۵۰ درصد) تا لحظه آزمایش قرار می‌گرفتند. بقیه نمونه‌ها از لحظه قالب‌برداری تا زمان آزمایش در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند.

روند ساخت نمونه‌ها توسط گرایبیل که در مقاله یاد شده ارائه شده است به این صورت است، بتن‌ریزی تمام نمونه‌های مورد آزمایش در طول مدت ۲۰ دقیقه پس از اختلاط کامل می‌شود. تمام نمونه‌ها در هنگام بتن‌ریزی روی میز ویبره قرار داده می‌شوند و پس از پر شدن قالب به مدت ۳۰ ثانیه ویبره می‌شوند. سپس سطح تمام نمونه‌ها توسط ورق پلاستیکی پوشیده می‌شوند تا سرعت از دست دادن رطوبت در نمونه‌ها کاهش یابد. باز کردن قالب‌ها پس از ۲۴ ساعت از زمان بتن‌ریزی انجام می‌شود. عمل‌آوری حرارتی پس از باز کردن قالب‌ها به دو صورت انجام می‌گیرد که قبلاً بدان اشاره شد. لازم به ذکر است که در این مطالعه از عمل‌آوری حرارتی استفاده نشده است.

۲-۱۰ مقایسه میان بتن توانمند و بتن فوق توانمند

با ساخت بتن فوق توانمند، بتن توانمند دیگر قوی‌ترین و با دوام‌ترین ماده ساخته شده از سیمان پرتلند نیست. جدول ۲-۸ برخی از خصوصیات بتن فوق توانمند و بتن توانمند را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

جدول ۲-۸ مقایسه بتن فوق توانمند و بتن توانمند

ویژگی	مقایسه بتن فوق توانمند و بتن توانمند
مقاومت فشاری	۲ تا ۳ برابر بزرگتر
مقاومت خمشی	۲ تا ۶ برابر بزرگتر
مدول الاستیک	۱/۵ برابر بزرگتر
تخلخل کلی	۴ تا ۶ برابر کمتر
تخلخل های ریز	۱۰ تا ۵۰ برابر کمتر
نفوذپذیری	۵۰ برابر کمتر
جذب آب	۷ برابر کمتر
انتشار یون کلر	۲۵ برابر کمتر
سایش	۲/۵ برابر کمتر
سرعت خوردگی	۸ برابر کمتر

۲-۱۱ خصوصیات بتن فوق توانمند

خصوصیات مکانیکی بتن فوق توانمند مورد مطالعه تعداد زیادی از محققان قرار گرفته است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱۱-۱ مقاومت فشاری بتن فوق توانمند

چریزی و ریچارد^۱ نشان دادند مقاومت فشاری بتن فوق توانمند در محدوده ۱۵۰-۲۰۰ مگاپاسکال تغییر می کند. فهلینگ^۲ و همکاران آزمایش‌هایی برای بررسی خصوصیات بتن فوق توانمند سخت شده انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که مقاومت فشاری این بتن از ۱۵۰-۲۲۰ مگاپاسکال تغییر می کند. چان و چو^۳ مقاومت فشاری RPC^۴ یا UHPC را بین ۲۰۰-۸۰۰ مگاپاسکال نشان دادند.

گرایبل^۵ یک برنامه آزمایشگاهی برای بررسی رفتار فشاری تک محوره UHPFRC^۶ انجام دادند. آن‌ها از نتایج این آزمایش برای تعیین مقاومت، مدول الاستیسیته و سایر مشخصات مربوطه به بتن فوق توانمند الیافی استفاده کردند. نتایج نشان داد که بتن فوق توانمند الیافی دارای مقاومت فشاری قابل توجه و سختی افزایش یافته چشمگیری است.

۲-۱۱-۲ مقاومت کششی بتن فوق توانمند

چریزی و ریچارد مقاومت کششی بتن فوق توانمند را در محدوده ۸-۱۵ مگاپاسکال گزارش کردند. هابل^۷ و همکاران نتایج آزمایش کششی تک محوره مربوط به بتن فوق توانمند الیافی و بتن مسلح شده با الیاف فولادی و بتن معمولی را ارائه کردند. آن‌ها نمودار تنش-تغییر شکل مربوط به هر یک از بتن‌ها را به دست آوردند و دریافتند که مقاومت کششی و رفتار سخت‌شوندگی بتن فوق توانمند الیافی به مراتب از سایر مواد سیمانی بهتر است.

¹ Cheyrezy & Richard

² Fehling

³ Chan & Chu

⁴ Reactive Powder Concrete

⁵ Graybeal

⁶ Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete

⁷ Habel

فهلینگ و همکاران خاطر نشان کردند که بسته به نوع، مقدار و جهت الیاف موجود در بتن فوق توانمند الیافی، مقاومت کششی آن می‌تواند در محدوده ۷-۱۵ مگاپاسکال تغییر کند. به دلیل اثر الیاف، رفتار نمونه‌ها انعطاف‌پذیر می‌شود. آزمایشات انجام شده در TU Delf نشان می‌دهند که جهت جریان بتن در خلال پروسه‌های بتن‌ریزی به شدت جهت فیبرها و در نتیجه انعطاف‌پذیری و مقاومت کششی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین فهلینگ و همکاران اشاره کردند که مقاومت کششی را می‌توان به‌طور آزمایشگاهی و با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای یا منشوری تعیین کرد. نتایج آزمایش‌های کششی مستقیم انجام گرفته بر روی بتن فوق توانمند بدون الیاف، مقادیر مقاومت کششی را بین ۷-۱۰ مگاپاسکال نشان داد.

۲-۱۱-۳ مقاومت برشی بتن فوق توانمند

هیگر^۱ و همکاران چندین آزمایش را برای بررسی رفتار نمونه‌های بتن فوق توانمند تحت اثر بارگذاری برشی انجام دادند. آنها نشان دادند که نیروی پیش‌تنیدگی ۱۲۰۰ کیلونیوتن را می‌توان بر روی نمونه اعمال کرد بدون اینکه در نمونه ترک ایجاد شود. بارهای شکست به‌دست آمده در این آزمایشات با بارهای طراحی یک تیر فولادی ساخته شده با ابعاد و وزن برابر، یکسان به‌دست آمدند. آنها با توجه به نتایج این آزمایش خاطر نشان کردند، ظرفیت تحمل بار این نوع بتن با شاه‌تیرهای فولادی ساخته شده با ابعاد مشابه، قابل مقایسه است. آنها تاکید کردند برای کاربردهای عملی، ظرفیت برشی تیرهای بتن فوق توانمند پیش‌تنیده کافی است و نیازی به فولادگذاری اضافه نمی‌باشد.

¹ Hegger

۲-۱۱-۴ مقاومت خمشی بتن فوق توانمند

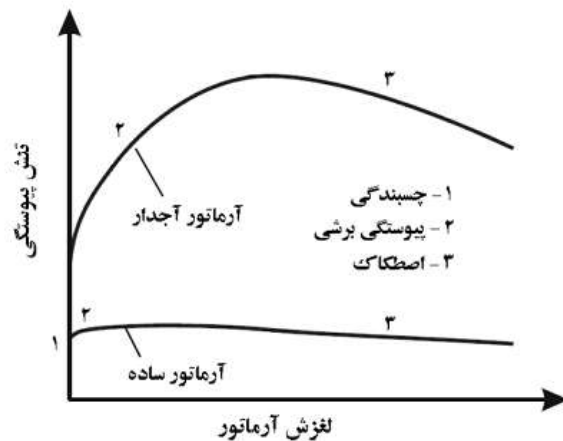
کولپاردی^۱ و همکاران مقاومت خمشی بتن فوق توانمند را ۲ تا ۶ برابر بزرگتر از مقاومت خمشی بتن توانمند گزارش کردند. همچنین گرایبل نشان داد که مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی در تیرهای بتن فوق توانمند پیش تنیده ۹/۶-۱۰/۳ مگاپاسکال است.

۲-۱۲ پیوستگی بتن و آرماتور

رفتار اعضای سازه‌ای بتن مسلح هنگامی که تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند وابسته به عوامل مختلفی است که یکی از موثرترین آن‌ها، میزان هماهنگی در تغییر شکل‌های بتن و آرماتور است. در اثر تغییر شکل‌های محوری که عموماً ناشی از خمش هستند، در سطح تماس آرماتور و بتن اطراف آن تنش برشی ایجاد می‌شود که موجب هماهنگی در تغییر شکل آرماتور و بتن می‌شود. این تنش برشی طولی، تنش پیوستگی خوانده می‌شود. با افزایش تغییر شکل محوری عضو، سرانجام تنش پیوستگی به حد نهایی خود، مقاومت پیوستگی می‌رسد که پس از این مرحله یکسانی تغییر شکل آرماتور و بتن اطراف آن از بین می‌رود. تغییر مکان موضعی سطح آرماتور نسبت به بتن اطراف آن، لغزش خوانده می‌شود. لغزش و بیرون کشیدگی آرماتور از بتن، منجر به شکست و خردشدگی موضعی بتن اطراف آرماتور می‌شود که به آن شکست پیوستگی گفته می‌شود. شکست پیوستگی، یکی از مدهای شکست مهم در اعضای بتن مسلح تحت خمش می‌باشد. ایجاد مقاومت پیوستگی لازم جهت تامین ظرفیت مطلوب عضو بتن مسلح، به‌ویژه در قسمت‌هایی که آرماتورهای پیوسته قطع می‌شوند، موضوع مهمی است که در هنگام طراحی سازه باید مورد توجه قرار گیرد. مقدار مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور وابسته به عوامل مختلفی چون مشخصات مکانیکی بتن و آرماتور، حداکثر میانگین تنش پیوستگی قابل ایجاد در طول آرماتور و چگونگی توزیع تنش پیوستگی

¹ Collepardi

در راستای طول آرماتور است. طول لازم جهت تامین مقاومت پیوستگی معادل ظرفیت کششی نهایی در آرماتور مسلح کننده، طول مهاری نامیده می شود. مقاومت پیوستگی آرماتورها بتن ناشی از سه مکانیزم چسبندگی شیمیایی، پیوستگی برشی و پایداری اصطکاکی (قفل و بست مکانیکی) بین بتن و آرماتور است. هنگامی که آرماتور دچار تغییر شکل محوری می شود، اولین عامل ایجادکننده پیوستگی بین آرماتور و بتن، چسبندگی شیمیایی بین سطح آرماتور و بتن چسبیده به آن است که به طور عمده وابسته به جنس و ترکیب شیمیایی آرماتور و بتن و نیز مشخصات هندسی سطح آرماتور است. با افزایش تغییر شکل، تنش پیوستگی برشی در بتن اطراف آرماتور ایجاد می شود که به شدت وابسته مشخصات سطح آرماتور است. با رسیدن تنش پیوستگی به حد مقاومت پیوستگی، لغزش موضعی اتفاق می افتد. در آرماتورها با سطح صاف (آرماتورهای ساده)، بسته به میزان مقاومت اصطکاکی آرماتورها، لغزش به سمت خارج اتفاق می افتد و در نتیجه شکست از نوع لغزش خواهد بود. در این نوع آرماتورها مکانیزم اصطکاکی فعال نمی شود و مقدار تنش برشی قابل تحمل توسط بتن، ظرفیت مقاومت پیوستگی را مشخص می نماید. در آرماتورهای با سطح غیرصاف (آرماتورهای آجدار)، پس از ایجاد لغزش، به دلیل هندسه سطح آرماتور، عموماً چفت و بست مکانیکی بین بتن و آج های آرماتور سبب بالا رفتن مقاومت پیوستگی می گردد. در این نوع آرماتورها، شکست نهایی پیوستگی با خرد شدن بتن اطراف آرماتور رخ می دهد. شکل ۲-۶ رابطه تنش پیوستگی با لغزش را برای آرماتور ساده و آجدار نشان می دهد.



شکل ۲-۶ رابطه شماتیک تنش پیوستگی-لغزش بری آرماتور ساده و آجدار

در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی برشی آرماتور آجدار با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بیشترین مقاومت پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های آرماتور و کلیدهای بتنی بین آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه در محل تماس آج آرماتور و بتن، تنش فشاری ایجاد می‌شود که در اثر آن در مقطع عرضی بتن اطراف آرماتور تنش‌های حلقوی کششی و در کلیدهای بتن بین آج‌ها تنش برشی تولید می‌شود. با توجه به این میدان تنش، دو نوع مود شکست پیوستگی قابل پیش‌بینی است. اگر تنش برشی موجود در کلیدهای بتنی بین آج‌های آرماتور از حد مقاومتی برشی بتن بگذرد، آرماتور به سمت خارج حرکت می‌کند و شکست از نوع بیرون کشیده شدن آرماتور از بتن خواهد بود. در این نوع شکست مکانیزم اصطکاک فعال می‌شود و با حفظ نیروی ناشی از پیوستگی، از گسیختگی ناگهانی عضو جلوگیری می‌کند. اگر تنش‌های حلقوی کششی، پیش از آنکه کلید بتن بین دو آج مجاور به صورت برشی کنده شود، از حد مقاومت کششی بتن تجاوز کند، ترک‌های شعاعی در بتن اطراف آرماتور ایجاد و نهایتاً موجب خردشدگی پوشش بتنی اطراف آرماتور و گسیختگی و شکاف بتن می‌شود (شکل ۲-۷). در این مرحله از رفتار پیوستگی بتن و آرماتور آجدار، تاثیر اصطکاک در ظرفیت نیروی پیوستگی نهایی ناچیز است که در نتیجه شکست ترد و ناگهانی است. این نوع شکست پیوستگی با نام شکافت خوانده می‌شود.

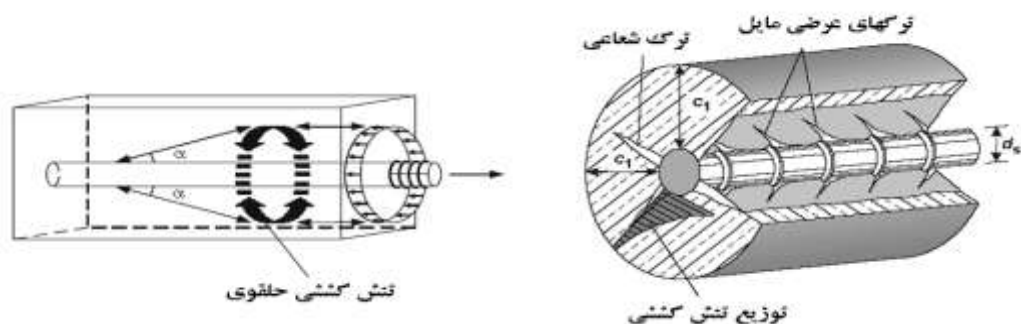
پارامترهای موثر بر پیوستگی بتن و آرماتور متعدد هستند و بررسی یکایک آن‌ها دشوار است. این پارامترها را می‌توان به صورت زیر به سه گروه تقسیم نمود (حسین و لاجمی^۱ (۲۰۰۸)).

۱- پارامترهای وابسته به آرماتورهای مسلح‌کننده: قطر آرماتور، فاصله آرماتورها، خصوصیات مکانیکی آرماتور، مشخصات سطح آرماتور، طول ناحیه تماس آرماتور و بتن.

۲- پارامترهای وابسته به بتن: خصوصیات مکانیکی بتن، پوشش بتن روی آرماتور، جهت بتن‌ریزی نسبت به راستای آرماتور.

۳- پارامترهای وابسته به آزمایش پیوستگی: سرعت بارگذاری، جهت بارگذاری، وجود فشار محصورکننده، شرایط ویژه دستگاه آزمایش.

در ادامه برخی از عوامل تاثیرگذار بر مقاومت پیوستگی مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۷ تنش کششی حلقوی در بتن اطراف آرماتور و ترک‌های شعاعی ناشی از آن (هولچماچر

و همکاران^۲ (۲۰۰۴))

¹ Hossain, K.M.A., Lachemi, M.

² Holschemacher, K. et. al.

۲-۱۳ طول گیرایی

طول گیرایی، طول بخشی از آرماتور است که با بتن در تماس می‌باشد و تنش پیوستگی در آن ایجاد می‌شود. با افزایش طول گیرایی، نیروی مورد نیاز برای بیرون کشیدگی آرماتور از درون بتن افزایش می‌یابد. هنگامی که طول گیرایی به اندازه کافی بزرگ باشد، آرماتور قبل از بیرون کشیده شدن یا شکافت، جاری می‌شود. حداقل طول گیرایی که برای ایجاد نیروی جاری شدن در آرماتور لازم است به طول مهاری معروف است. معمولاً طول مهاری به عنوان نماینده مشخصات پیوستگی آرماتور به‌شمار می‌رود. طبیعت رابطه تنش پیوستگی (میانگین نیروی بیرون کشیدگی تقسیم بر سطح ناحیه گیرایی آرماتور) تجربی است. محققان بر روی طول گیرایی معینی اتفاق نظر ندارند و طول گیرایی در آزمایشات مختلف متفاوت است. هنگامی که طول گیرایی افزایش می‌یابد، میانگین تنش پیوستگی حاصل از آزمایشات تیری یا بیرون کشیدگی کاهش می‌یابد (متی و واتستین^۱ (۱۹۶۱)).

۲-۱۴ تاثیر پوشش بتن روی آرماتور

یکی از پارامترهای مهم که پیوستگی میان بتن و آرماتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد، پوشش بتنی روی آرماتور است. به‌سادگی قابل تصور است که چگونه پوشش بتن مقاومت پیوستگی و خصوصیات سطح تماس را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بتنی که اطراف یک آرماتور تحت کشش را احاطه کرده است تحت اثر تنش های فشاری قرار دارد. هنگامی که پوشش بتن کوچک باشد، بتن ممکن است تحت اثر این تنش های فشاری بشکند.

تاثیر پوشش بتن بر مقاومت پیوستگی نهایی توسط محققین بررسی شده است. فرگوسون^۲ و همکاران نشان دادند که نمونه‌های تیری با پوشش تحتانی بیشتر، از خود مقاومت پیوستگی بیشتری نشان می‌

¹ Mathey, R.G., Watstein, D.

² Ferguson

دهند. همچنین، فرگوسون و تامسون^۱ تاثیر پوشش بتن را بر مقاومت پیوستگی با استفاده از آزمایش تیر خمشی مورد بررسی قرار دادند، که نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج مطالعه سال ۱۹۵۴ همخوانی داشت. آزمایشات بیرون کشیدگی انجام شده توسط فرگوسون و همکاران نشان داد که شکافت بتن در نمونه‌های با پوشش کمتر نسبت به نمونه‌های با پوشش بیشتر، بیشتر رخ می‌دهد. چین^۲ و همکاران تاثیر پوشش بتن بر مقاومت پیوستگی وصله‌ها را مورد بررسی قرار دادند. همچنین فرگوسون و همکاران تاثیر پوشش بتن را بر مقاومت پیوستگی بررسی کردند. واردس و یانوپولوس^۳ تاکید کردند، حداکثر تنش پیوستگی با افزایش پوشش بتن افزایش می‌یابد.

گروه سب^۴ تلاش کردند تا یک تعریف کلی از قانون پیوستگی موضعی تحت اثر نیروهای کششی ارائه نمایند. هنگامی که پوشش بتن به اندازه کافی ضخیم باشد تا از شکافت بتن جلوگیری کند، خرد شدن بتن جلوی شیارهای آرماتور اتفاق خواهد افتاد، بنابراین شکافت تحت اثر بار بیشتری، در نتیجه عمل گره‌ای حاصل از حرکت بتن خرد شده، اتفاق می‌افتد. در یک پوشش خیلی ضخیم، ترک‌های برشی در فاصله بین شیارها اتفاق می‌افتد، بنابراین به جای شکست شکافت، شکافت پیوستگی برشی (شکست بیرون کشیدگی) رخ می‌دهد. در این گزارش توصیه شد که برای تعیین اندازه ضخامت پوشش بتن، دو جنبه متفاوت باید در نظر گرفته شود: ۱- ایجاد درگیری مکانیکی کافی بین بتن و آرماتور، ۲- محافظت از آرماتور در برابر حمله عوامل محیطی مانند کلریدها، اسیدها یا دی اکسید کربن‌ها به منظور جلوگیری از خوردگی.

اصفهانی^۵ و همکاران با مطالعه‌ای که بر روی داده‌های آزمایشگاهی انجام شد، نشان دادند که توزیع تنش پیوستگی تحت تاثیر نسبت C_{med}/C قرار دارد که C_{med} برابر با میانگین سه عدد C_x و C_y و

¹ Ferguson & Thompson

² Chinn

³ Wards & Yannopoulos

⁴ CEB Task Group VI

⁵ Esfahani

تنش پیوستگی حداکثر در طول گیرایی به مقدار $C_{med}/C = 1$ است. هنگامی که $(C_s + d_b)/2$ تنش پیوستگی میانگین میل می‌کند و شکست شکافت اتفاق می‌افتد. در این حالت، امکان ایجاد ترک خوردگی طولی، قبل از اینکه شکست اتفاق بیافتد، در طول گیرایی وجود ندارد. هنگامی که $C_{med}/C > 1$ باشد، ترک خوردگی پوسته بتن می‌تواند در انتهای طول گیرایی که تنش پیوستگی حداکثر در آن نقطه وجود دارد، به وجود می‌آید و به آرامی به سمت مرکز حرکت کند.

اینستروم^۱ و همکاران نتایجی را درباره تاثیر دورگیری و پوشش بتن بر پیوستگی در بتن مقاومت بالا ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که کاهش در ضخامت پوشش تا ۱۶ میلی‌متر (برابر قطر آرماتور) سبب افت ۲۵ درصدی حداکثر تنش پیوستگی در مقایسه با نمونه خوب محصور شده (دارای پوشش کافی) می‌گردد. هنگامی که از تنگ یا از پوشش ۳۲ میلی‌متر استفاده گردد، میزان بار مشابه حالت بتن خوب محصور شده خواهد بود.

براساس گزارش‌های اخیر نشریه ۴۴۰ آمریکا^۲، شکست شکافت زمانی اتفاق می‌افتد که ضخامت پوشش بتن از دو برابر قطر آرماتور کمتر باشد. هنگامی که ضخامت پوشش بتن از دو برابر قطر آرماتور بیشتر باشد، احتمال شکست بیرون کشیدگی بیشتر است. کمیته AC1440 تاکید می‌کند که ضخامت پوسته بتن در آرماتورهای FRP^۳ نباید از قطر آرماتور کمتر باشد.

۲-۱۵ قطر و هندسه آرماتور

تنش پیوستگی در یک آرماتور به تنش برشی طولی بین آرماتور و بتن اطراف آن گفته می‌شود. این تنش برشی می‌تواند با کاهش ناحیه سطح تماس که تابعی از قطر آرماتور است، افزایش یابد. بنابراین می‌توان گفت که اندازه قطر آرماتور ممکن است بر مقدار تنش پیوستگی موثر باشد.

¹ Engstrom

² American Concrete Institute-Committee 440

³ Fiber Reinforced Polymers

داروین^۱ و همکاران در دو مقاله جداگانه و همچنین داروین و گراهام^۲ در سال ۱۹۹۳ نشان دادند که افزایش در سطح نسبی شیار آرماتور R_r (نسبت تصویر سطح شیار در جهت عمود بر محور آرماتور به حاصل ضرب قطر اسمی آرماتور در فاصله مرکز تا مرکز شیار) مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن را در آرماتورهای محصور شده توسط فولادگذاری جانبی، افزایش می‌دهد. همچنین مطالعات بیشتر نشان داد که افزایش در R_r ، مقاومت پیوستگی فولادگذاری با پوشش اپوکسی را در هر دو حالت دارای فولاد محصور کننده و بدون فولاد محصور کننده افزایش می‌دهد.

عزیز نامینی^۳ و همکاران نشان دادند که لغزش آرماتور جایگذاری شده در بتن به پارامترهای مختلفی مانند هندسه شیار آرماتور، حداقل پوشش بتن و غیره بستگی دارد.

۲-۱۶ نانوسیلیس

بتن‌ها و ملات‌های مقاومت بالا با مقاومت و دوام بالا دارای مزیت‌های بسیار زیادی هستند. با توجه به بهتر بودن خصوصیات مکانیکی و نفوذپذیری اندک، این نوع بتن به تدریج جای بتن معمولی را گرفته است. به دلیل خصوصیات برجسته، این نوع بتن می‌تواند در سازه‌ها نیز به منظور تحمل بارهای وارده و یا به دلیل تاثیر پذیری از شرایط محیطی در پل‌های بزرگ و ساخت و سازهای متعدد مورد استفاده قرار گیرد.

¹ Darwin

² Darwin & Graham

³ Aziznamini



شکل ۲-۸ نانوسیلیس

میکروسیلیس به عنوان یک ماده مکمل سیمان به طور گسترده‌ای برای تولید بتن‌های توانمند مورد استفاده قرار گرفته است. از این ماده به منظور افزایش مقاومت و کارایی بتن استفاده می‌شود. در آزمایشات متعدد مشاهده شده است که با جایگزین کردن بخشی از سیمان با میکروسیلیس، مقاومت در برابر سولفات‌ها و اسیدها افزایش یافته و نفوذپذیری کلر در بتن کاهش می‌یابد. هنگامی که میکروسیلیس به بتن و یا ملات سیمان افزوده می‌شود، به دلیل ریزدانه بودن فضای خالی میان ذرات سیمان را پر می‌کند، در نتیجه ساختار حفره‌های موجود کوچکتر خواهند شد. همچنین به دلیل واکنشی که میان سیلیس و هیدروکسید کلسیم باقیمانده از فرآیند هیدراتاسیون سیمان انجام می‌شود، ژل C-S-H بیشتری تولید شده و در نتیجه ترک‌های حاصل از موبینگگی بیشتر پوشیده خواهند شد.

فصل سوم:

انواع آزمایش های پیوستگی و روابط تنش پیوستگی

۳-۱ آزمایش های پیوستگی

۳-۱-۱ آزمایش بیرون کشیدگی

آزمایش بیرون کشیدگی (شکل ۳-۱) قدیمی ترین، ساده ترین ارزان ترین و کم زمان بر ترین روش برای تعیین تنش پیوستگی است. در این آزمایش آرماتور در یک نمونه بتنی به شکل استوانه یا مکعب قرار داده می شود و سپس در حالی که بتن در جای خود ثابت نگه داشته شده است، آرماتور به سمت خارج کشیده می شود. از آنجا که آرماتور تحت کشش قرار دارد و بتن تحت فشار، کرنش نسبی به وجود آمده سبب ایجاد لغزش نسبی می گردد.



شکل ۳-۱ آزمایش بیرون کشیدگی

این آزمایش می تواند مقایسه خوبی میان مقاومت پیوستگی و طول های گیرایی متناظر ارائه دهد. با این حال، این آزمایش تنش پیوستگی را بیشتر از تنش پیوستگی واقعی که در یک تیر خمشی ایجاد می شود، نشان می دهد. دلیل این امر را می توان به ایجاد فشار طولی در بتن و قید اصطکاکی ایجاد شده توسط صفحه تکیه گاه نسبت داد. بنابراین می توان گفت، اگر چه آزمایش بیرون کشیدگی ساده ترین روش برای مطالعه اثر پارامترهای مختلف بر پیوستگی می باشد، همانطور که در

ASTMC234-91a¹ اشاره شده است، این روش آزمایشگاهی برای تعیین مقادیر پیوستگی برای اهداف طراحی مناسب نیست.

آزمایش بیرون کشیدگی توسط بسیاری از محققان برای مطالعه اثر پارامترهای مختلف بر مقاومت پیوستگی مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش برای ایجاد تنش‌های پیوستگی یکنواخت در طول آرماتور از طول‌های گیرایی کوتاه استفاده می‌شود که به آن پیوستگی موضعی گفته می‌شود.

۳-۱-۲ آزمایش کششی

از آزمایش کششی برای مطالعه مکانیک پیوستگی بین بتن و آرماتور استفاده می‌شود. نمونه‌های مورد آزمایش شامل یک آرماتور قرار داده شده در استوانه یا مکعب می‌باشند (شکل ۳-۲) که تحت اثر کشش محوری اعمال شده در دو سر آرماتور قرار می‌گیرند. با کمک این آزمایش می‌توان رابطه بین لغزش آرماتور با تنش پیوستگی و نحوه شکل‌گیری ترک‌ها را مشخص کرد. همچنین این آزمایش قادر است رفتار تیرهای بتنی مسلح بین دو ترک اولیه را شبیه‌سازی کند.



شکل ۳-۲ آزمایش کششی

۳-۱-۳ آزمایش تیری

آزمایش تیری به صورت اعمال خمش چهار نقطه‌ای بر نمونه تیر وصله شده انجام می‌شود که از آن برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول وصله، به منظور اهداف طراحی سازه‌ها استفاده می‌شود. این

¹ American Standard for Testing and Material

آزمایش نسبت به آزمایش بیرون کشیدگی دارای قابلیت اعتماد بیشتری است زیرا اثر ترک‌های خمشی را نیز نشان می‌دهد. این در حالی است که این آزمایش نسبت به آزمایش بیرون کشیدگی گران‌تر و زمان‌برتر است. همچنین تفسیر نتایج حاصل از آزمایشات تیری نسبت به نتایج حاصل از آزمایشات بیرون کشیدگی مشکل‌تر است. در این آزمایش، مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور در تیرها، در ناحیه‌ای که لنگر ثابت است مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان‌طور که گفته شد، مقاومت پیوستگی حاصل از آزمایشات به نوع آزمایش پیوستگی بستگی دارد.

نتایج آزمایشات انجام شده توسط مادی و واتستین^۱ خاطر نشان می‌کند که تنش پیوستگی نهایی در نمونه‌های بیرون کشیدگی با مقادیر حاصل از نمونه‌های تیری که در آنها از فولادگذاری با قطر ۴ میلی‌متر استفاده شده تفاوتی ندارند، اما در مورد آرماتورهای با قطر ۶ میلی‌متر این امر صادق نیست.

۳-۱-۴ آزمایش تیری طره ای

کمپ^۲ و همکاران برای غلبه بر برخی مشکلات مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی، آزمایش تیری طره‌ای را توسعه دادند. مزیت این آزمایش بر آزمایش تیری در این نکته است که نمونه‌های آزمایش طره‌ای نسبت به نمونه‌های آزمایش تیری ارزان‌تر و کوچک‌تر است. از جمله معایب این روش می‌توان به این مطلب اشاره کرد که برای یک طول معین، طول بیشتری از بتن تحت اثر شکافت قرار دارد (نسبت به آنچه در اعضای واقعی وجود دارد). این امر سبب می‌شود مقاومت پیوستگی ظاهری بسیار بزرگتر گردد. اشکال دیگر این روش فشار محصور کننده‌ای است که بر آرماتور توسط عکس‌العمل تکیه‌گاهی اعمال می‌شود.

¹ Mathey & Watstein

² Kemp

۲-۳ روابط تنش پیوستگی

کمیته ACI 408 روابط ارائه شده برای پیش‌بینی تنش پیوستگی را در پنج گروه آورده است که در ادامه، این روابط ارائه می‌شوند.

۱-۲-۳ رابطه Orangun, Jirsa, and Breen

این روابط که در سال‌های ۱۹۷۵ و ۱۹۷۷ براساس یک مطالعه آماری ارائه شده است، تنش پیوستگی در دو حالت وجود و عدم وجود آرماتور جانبی را تخمین می‌زند.

$$\frac{u_c}{\sqrt{f'_c}} = 0.10 + 0.25 \frac{c_{\min}}{d_b} + 4.15 \frac{d_b}{l_b} \quad (۱-۳)$$

در این رابطه u_c تنش پیوستگی، f'_c مقاومت فشاری بتن، c_{\min} کوچکترین مقدار بین حداقل پوشش بتنی روی آرماتور و نصف فاصله آزاد بین آرماتورها، d_b قطر آرماتور و l_b طول گیرایی می‌باشد.

۲-۲-۳ رابطه داروین^۱ و همکاران

داروین و همکاران با بررسی نتایج ۲۹۹ آزمایش پیوستگی تیری، ضمن بررسی صحت پاسخ روابط Orangun, Jirsa, And Breen، رابطه‌ای را برای تعیین مقدار تنش پیوستگی و طراحی طول وصله ارائه نمودند که در آن اثر آرماتور جانبی، مقدار تنش در آرماتور اصلی و سطح نسبی آج آرماتور دیده شده بود. در این پژوهش نتیجه‌گیری شد که منظور کردن اثر مقدار مقاومت بتن در تنش پیوستگی به‌صورت همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشات دارد. همچنین مشخص گردید که تعداد، فاصله و سطح

^۱ Darwin

مقطع آرماتورهای عرضی تاثیر مهمی در یکنواخت نمودن توزیع تنش پیوستگی دارد در حالی که تنش جاری شدن آرماتورهای جانبی اثر مهمی بر تنش پیوستگی نهایی ندارد.

$$\frac{T_c}{(f'_c)} = [1.5l_d(c_{\min} + 0.5d_b) + 51A_b] \left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.90 \right) \quad (2-3)$$

در این رابطه T_c نیروی کششی در آرماتور بر حسب نیوتن ($T_c = u_c \times \pi \times d_b \times l_d$)، f'_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، l_d طول گیرایی بر حسب میلی‌متر، c_{\min} حداقل دو مقدار c_b و c_s ، d_b قطر آرماتور بر حسب میلی‌متر، A_b سطح مقطع آرماتور، c_{\max} حداکثر دو مقدار c_b و c_s ، c_b پوشش پایین آرماتور، c_s حداقل دو مقدار پوشش جانبی و نصف فاصله آزاد بین آرماتورها می‌باشد. برای برقراری این رابطه باید داشته باشیم:

$$\left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.90 \right) < 1.25 \quad (3-3)$$

۳-۲-۳ رابطه ژائو و داروین^۱

در سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۰، ژائو و داروین رابطه داروین را به صورت زیر اصلاح و ارائه کردند:

$$\frac{T_c}{(f'_c)^{1/4}} = [1.43l_d(c_{\min} + 0.5d_b) + 56.2A_b] \left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.90 \right) \quad (4-3)$$

پارامترها و شرایط این رابطه مشابه رابطه (۲-۳) می‌باشد.

¹ ZUO & Darwin

۳-۲-۴ رابطه اصفهانی و رنگان^۱

این رابطه که در سال ۱۹۹۸ ارائه شد، اصلاح و گسترش تئوری تپفرس^۲ بود که به صورت زیر می-باشد:

$$u_c = 4.9 \frac{\left(\frac{c}{d_b} + 0.5\right)}{\left(\frac{c}{d_b} + 3.6\right)} f_{ct} : f'_c < 50 \text{Mpa} \quad (۵-۳)$$

$$u_c = 8.6 \frac{\left(\frac{c}{d_b} + 0.5\right)}{\left(\frac{c}{d_b} + 5.5\right)} f_{ct} : f'_c > 50 \text{Mpa} \quad (۶-۳)$$

در این رابطه u_c تنش پیوستگی، c حداقل پوشش بتنی روی آرماتور، d_b قطر آرماتور، $f_{ct} = 0.55\sqrt{f'_c}$ مقاومت کششی بتن و f'_c مقاومت فشاری بتن می-باشد.

۳-۳ نمونه های مورد بررسی

در این مطالعه به بررسی ۹۶ نمونه آزمایشگاهی جهت مشخص نمودن اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق توانمند و آرماتورهای فولادی پرداخته شد. تنش پیوستگی بتن فوق توانمند و آرماتور فولادی در دو حالت آرماتور شماره ۱۲ و آرماتور شماره ۱۴ با طول پیوستگی و پوشش بتن برابر d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ بررسی شد. جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی از آزمایش بیرون کشیدگی برای تعیین تنش پیوستگی استفاده شد. در این آزمایش آرماتور در یک نمونه بتنی به شکل استوانه یا مکعب قرار داده می-شود و سپس در حالی که بتن در جای خود ثابت نگه داشته شده است، آرماتور به

¹ Esfahani & Rangan

² Tepfers

سمت خارج کشیده می‌شود. نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها بدین صورت است که مثلاً در نمونه R14، R14C3L3 بدین معنی می‌باشد که آزمایشات براساس استاندارد RILEM انجام شده و آرماتور بررسی شده شماره ۱۴ می‌باشد. C3 حالت پوشش بتن در نمونه‌های مکعبی را نشان می‌دهد، با توجه به در نظر گرفتن پوشش بتن با مقدار d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ حالت سوم پوشش بتن می‌باشد که برای این نمونه برابر $3 \times 4 = 12$ میلی‌متر می‌باشد. L3 حالت طول پیوستگی بتن و آرماتور فولادی در نمونه‌های مکعبی را نشان می‌دهد، با توجه به در نظر گرفتن طول پیوستگی بتن و آرماتور فولادی با مقدار d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ حالت سوم پیوستگی بتن و آرماتور فولادی می‌باشد که برای این نمونه برابر $3 \times 4 = 12$ میلی‌متر می‌باشد.

در اشکال زیر نمونه‌هایی از کارهای انجام شده در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد آورده شده است.



شکل ۳-۳ بریدن لوله پلیکا برای تنظیم کردن طول پیوستگی



شکل ۳-۴ نمونه گیری از بتن فوق توانمند با نمونه استاندارد استوانه ای



شکل ۳-۵ ساختن نمونه های پیشنهادی



شکل ۳-۶ نمونه های ساخته شده جهت انجام آزمایش بیرون کشیدگی

جدول ۳-۱ مشخصات نمونه ها

نام نمونه		d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی
R12C1L1-1	d_b	۱۲	۱۲	۱۲
R12C1L1-2		۱۲	۱۲	۱۲
R12C1L1-3		۱۲	۱۲	۱۲
R12C2L2-1	$2d_b$	۱۲	۲۴	۲۴
R12C2L2-2		۱۲	۲۴	۲۴
R12C2L2-3		۱۲	۲۴	۲۴
R12C3L3-1	$3d_b$	۱۲	۳۶	۳۶
R12C3L3-2		۱۲	۳۶	۳۶

R12C3L3-3		۱۲	۳۶	۳۶
R12C4L4-1	$4d_b$	۱۲	۴۸	۴۸
R12C4L4-2		۱۲	۴۸	۴۸
R12C4L4-3		۱۲	۴۸	۴۸
R14C1L1-1	d_b	۱۴	۱۴	۱۴
R14C1L1-2		۱۴	۱۴	۱۴
R14C1L1-3		۱۴	۱۴	۱۴
R14C2L2-1	$2d_b$	۱۴	۲۸	۲۸
R14C2L2-2		۱۴	۲۸	۲۸
R14C2L2-3		۱۴	۲۸	۲۸
نام نمونه		d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی
R14C3L3-1	$3d_b$	۱۴	۴۲	۴۲
R14C3L3-2		۱۴	۴۲	۴۲
R14C3L3-3		۱۴	۴۲	۴۲
R14C4L4-1	$4d_b$	۱۴	۵۶	۵۶
R14C4L4-2		۱۴	۵۶	۵۶
R14C4L4-3		۱۴	۵۶	۵۶
R14C2L1	$2d_b$	۱۴	۲۸	۱۴
R14C2L2		۱۴	۲۸	۲۸
R14C2L3		۱۴	۲۸	۳۲
R14C2L4		۱۴	۲۸	۵۶
R14C1L2	$2d_b$	۱۴	۱۴	۲۸
R14C2L2		۱۴	۲۸	۲۸
R14C3L2		۱۴	۳۲	۲۸
R14C4L2		۱۴	۵۶	۲۸

فصل چهارم: بررسی و ارزیابی نتایج

برای استفاده از آرماتورهای فولادی در سازه‌های بتن‌آرمه با بتن فوق‌توانمند باید روابط طراحی جدیدی برای بررسی پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتور فولادی ارائه شود. بررسی پیوستگی بین بتن فوق‌توانمند و آرماتورهای فولادی، یکی از بحث‌های مهمی است که در طراحی سازه‌های بتن‌آرمه باید مورد توجه قرار گیرد. در فصل چهارم به بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی در این خصوص پرداخته می‌شود.

۴-۲ مطالعه آزمایشگاهی

۴-۲-۱ طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند

همانطور که در فصل‌های گذشته اشاره شد، تاکنون طرح اختلاط‌های بسیاری برای بتن فوق‌توانمند ارائه شده است. پس از مطالعه و آزمایش چندین طرح اختلاط و امکان‌سنجی تولید آن در آزمایشگاه، طرح اختلاط ارائه شده توسط اسچنیدر^۱ مورد استفاده قرار گرفت. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، مقادیر ۲/۵، ۴/۵ و ۶/۵ درصد وزنی سیمان از میکروسیلیس با نانوسیلیس جایگزین شد. طرح اختلاط‌های مورد استفاده در جدول (۴-۱) آورده شده است. مقادیر ذکر شده در جدول بر حسب کیلوگرم در متر مکعب می‌باشند. سیمان مورد استفاده از نوع تیپ I با رده مقاومتی 525 kg/cm^2 می‌باشد. میکروسیلیس استفاده شده از شرکت ژیکاوآ تهیه شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۴-۲) آورده شده است و فوق‌روان‌کننده مورد استفاده از شرکت هابی^۲ تهیه شد. این فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات می‌باشد. نانوسیلیس مورد استفاده در این پژوهش از شرکت نانو پارس لیما تهیه شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۴-۲) آورده شده است.

¹ Schneider

² Ha-Be

جدول ۴-۱ طرح اختلاط بتن فوق توانمند مورد استفاده در آزمایشات

فوق روان کننده	آب	نانوسیلیس	میکروسیلیس	پودر کوارتز	شن کوارتز	سیمان	نوع طرح
۲۳	۱۷۸	۰	۲۰۰	۲۸۵	۱۰۲۰	۶۶۵	۱
۲۳	۱۷۸	۱۶/۶۲۵	۱۸۳/۳۷۵	۲۸۵	۱۰۲۰	۶۶۵	۲
۲۳	۱۷۸	۲۹/۹۲۵	۱۷۰/۰۷۵	۲۸۵	۱۰۲۰	۶۶۵	۳
۲۳	۱۷۸	۴۳/۲۲۵	۱۵۶/۷۷۵	۲۸۵	۱۰۲۰	۶۶۵	۴

*مقادیر ذکر شده در جدول بر حسب کیلوگرم در متر مکعب می باشد

جدول ۴-۲ ترکیب شیمیایی میکروسیلیس و نانوسیلیس

نام عنصر (%)	SiO ₂	SiC	C	Fe ₂ O ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
میکروسیلیس	۹۳/۶	۰/۵	۰/۳	۰/۳۷	۱/۰۱	۰/۱۶	۰/۱	۰/۰۴	۱/۳۲	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۳۱
نانوسیلیس	۹۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

عموماً روندهای اختلاط در طرحهای مختلف یکسان هستند. ابتدا پودرهای خشک تا زمانی که یک مخلوط همگن به دست آید، با یکدیگر مخلوط می شوند. این بخش می تواند چندین دقیقه به طول انجامد. سپس بخشی از آب و نیمی از فوق روان کننده به اختلاط اضافه می شود. مخلوط کردن تا زمانی ادامه می یابد که مایع کاملاً ترکیب شود. سپس باقیمانده آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه می شود. با توجه به طرح اختلاط موجود در این پژوهش، روند اختلاط به صورت زیر در نظر گرفته شد:

- تمام اجزای تشکیل دهنده وزن شوند.

- نصف فوق روان کننده به آب اضافه شود.

- مصالح خشک شامل پودر کوارتز، شن کوارتز، سیمان و میکروسیلیس در مخلوط کن (شکل ۴-۱) به مدت ۲ دقیقه مخلوط شوند.
- آب به آرامی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شود.
- یک دقیقه مکث و سپس باقیمانده فوق روان کننده به مخلوط در مدت ۳۰ ثانیه افزوده شود.
- مخلوط کردن تا زمانی که بتن از حالت پودر خشک به شکل ملات تبدیل شود، ادامه پیدا کند. (این زمان تقریباً برابر با یک دقیقه می باشد).



شکل ۴-۱ مخلوط کردن مصالح خشک

- روند اختلاط در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس به صورت زیر انجام شد:
- تمام اجزای تشکیل دهنده وزن شدند.
- نانوسیلیس مورد استفاده به همراه نصف فوق روان کننده و آب به مدت ۳۰ دقیقه توسط همزن با یکدیگر مخلوط شدند.
- مصالح خشک شامل پودر کوارتز، شن کوارتز، سیمان و میکروسیلیس در مخلوط کن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند.

- مخلوط آب و نانوسیلیس به آرامی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شد.
- یک دقیقه مکث و سپس باقیمانده فوق روان کننده به مخلوط در مدت ۳۰ ثانیه افزوده شد.
- مخلوط کردن تا زمانی که بتن از حالت پودر خشک به شکل ملات تبدیل شود، ادامه پیدا کرد.
(این زمان تقریباً برابر با یک دقیقه می باشد).

۳-۴ آزمایش مقاومت فشاری

برای اندازه گیری مقاومت فشاری بتن، نمونه هایی از آن تهیه و تا عمر معین در آزمایشگاه نگهداری می شود. روند کسب مقاومت بتن تحت تأثیر دو عامل است:

۱- زمان ۲- دما

مقاومت بتن با پیشرفت هیدراسیون سیمان افزایش می یابد. روند هیدراسیون سیمان نیز با گذشت زمان همچنین افزایش دما زیاد می شود. در نتیجه مقاومت بتن را می توان به صورت تابعی از ترکیب دما-زمان بیان کرد و از آنجا که مقاومت بتن به هر دو عامل عمر و دما بستگی دارد، می توان گفت که مقاومت تابعی از (دما × فاصله زمانی) است و حاصل این انتگرال را بلوغ بتن می نامند.

برای ثابت نگاه داشتن تأثیر دما بر مقاومت بتن تمام نمونه ها را در دمای ۲۰ درجه نگهداری کردیم. مقاومت بتن در عمر های ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه تعیین گردید. مبنای پذیرش بتن، آزمایش مقاومت در عمر ۲۸ روزه و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بود و مقاومت در عمرهای دیگر (مثلاً ۷ روزه) تنها برای به دست آوردن تخمینی از مقاومت ۲۸ روزه به کار رفت و نمی تواند مبنای رد یا قبول بتن باشد. مقاومت ۷ روزه تقریباً ۰/۷ تا ۰/۸ مقاومت ۲۸ روزه است.

مقاومت مشخصه مقاومتی است که ۹۵ درصد نمونه ها مقاومتی بالاتر از آن دارند و تنها ۵ درصد از کلیه نتایج آزمایش می توانند در زیر این مقدار قرار گیرند.

نمونه‌ها را به دو شکل استوانه‌ای و مکعبی قالب می‌کنند. آیین‌نامه ACI فقط نمونه استوانه‌ای را می‌پذیرد. در انگلستان و آلمان نمونه مکعبی و در فرانسه نمونه استوانه‌ای رواج دارد. در ایران هر دو نمونه ساخته می‌شود ولی از نمونه استوانه‌ای بیشتر استفاده می‌شود.

وسایل مورد نیاز:

۱- جک بتن‌شکن نیمه اتوماتیک

جک بتن‌شکن ۳۰۰ تن نیمه اتوماتیک برای تست و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی استوانه‌ای و مکعبی طراحی شده است. کنترل سرعت بارگذاری در حین آزمایش مقاومت فشاری از پارامترهای تعیین کننده در آزمایش می‌باشد که در این دستگاه میزان انحراف سرعت بارگذاری روی صفحه نمایشگر نشان داده شده که تنظیمات آن توسط کاربر انجام می‌شود. به طوری در صورت پایین و بالا بودن سرعت بارگذاری با کم یا زیاد کردن جریان روغن هیدرولیک فشار دستگاه به حالت تنظیمات قبلی بر می‌گردد. این عمل باعث کنترل سرعت بارگذاری به صورت کاملاً واقعی از ابتدا تا انتهای آزمایش می‌شود.

۲- قالب‌های استوانه‌ای جهت ساختن نمونه‌های بتنی:

نمونه‌های استاندارد به اندازه قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. در صورت استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای دیگر، باید از ضرایب تبدیل جهت تصحیح استفاده کرد.

هدف انجام آزمایش:

از آنجایی که مقاومت فشاری یکی از خواص مهم بتن محسوب می‌شود. اطلاع از این پارامتر نقش مهمی در کنترل کیفیت بتن و اصلاح روش‌های تهیه آن دارد.

روش انجام آزمایش:

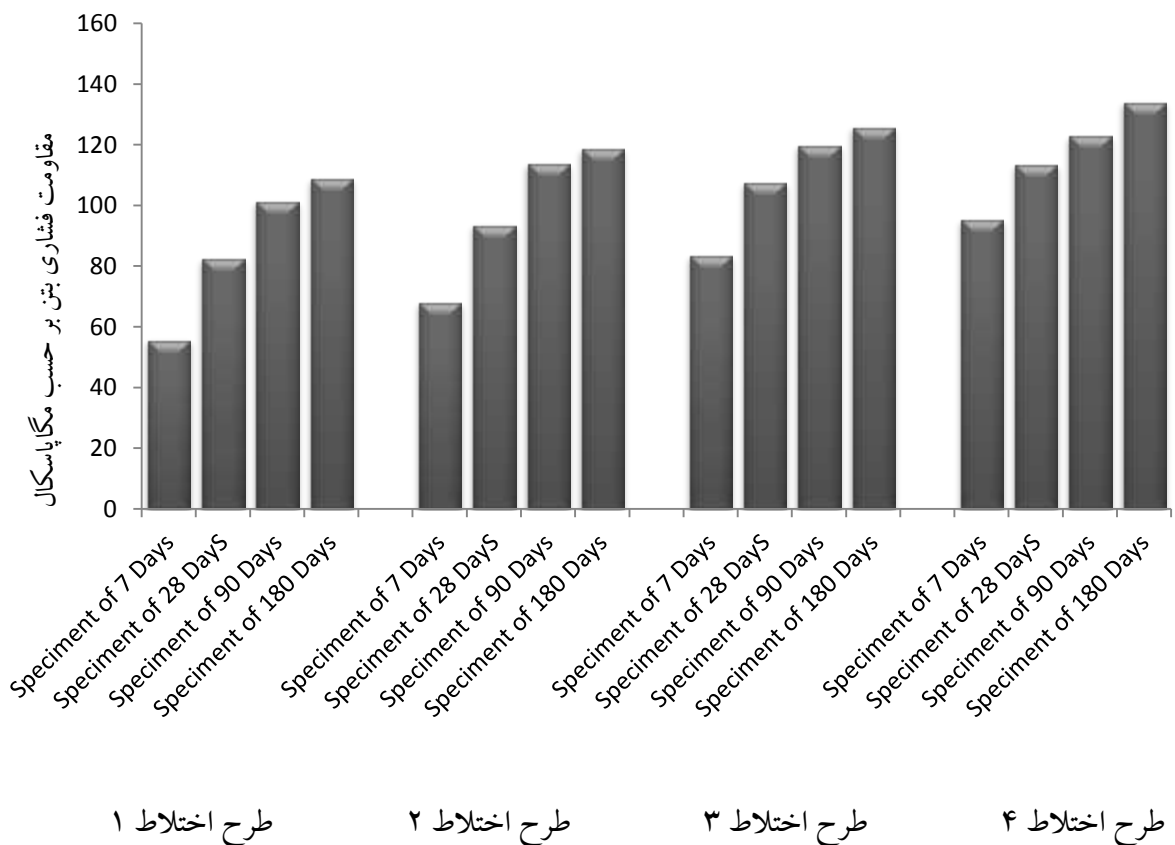
آزمایش مقاومت فشاری در روش ASTM روی نمونه‌های استوانه ای 150×300 میلی‌متری (6×12 اینچ) و در روش BS روی نمونه‌های مکعبی 150 میلی‌متری (6 اینچی) انجام می‌شود، اگرچه با توجه به بزرگترین اندازه سنگ‌دانه‌ها، استانداردها استفاده از نمونه‌های کوچکتر را نیز مجاز می‌دانند طبق استاندارد ASTM نمونه‌های استوانه‌ای در قالب‌های با قابلیت استفاده مجدد و یا قالب‌های یک بار مصرف ریخته می‌شوند. قالب‌های نوع اول معمولاً فولاد، چدن، برنج و انواع پلاستیک ساخته می‌شوند. در حالی که قالب‌های نوع دوم ممکن است از صفحات فلزی، پلاستیک، محصولات کاغذی ضد آب و یا سایر موادی که خواص فیزیکی خواسته شده نظیر غیر قابل نفوذ بودن و عدم جذب آب و عدم تغییر طول را تأمین می‌کنند، ساخته می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از چسبیدگی بتن به جدار قالب، باید جداره‌های داخلی قالب با یک لایه‌ی نازک روغن معدنی آغشته گردد (شکل ۴-۲)، سپس بتن در چند لایه داخل قالب ریخته شود. تراکم بتن‌های با اسلامپ بالا در چند لایه و با زدن ۲۵ ضربه به هر لایه توسط یک میله‌ی گرد به قطر ۱۶ میلی‌متر انجام می‌شود. تراکم بتن‌های با اسلامپ پایین در دو لایه و با ویبره‌های داخلی و خارجی انجام می‌شود. شرایط نگهداری استوانه‌های استاندارد نیز بدین ترتیب است که در آزمایشگاه به‌منظور جلوگیری از کاهش رطوبت نمونه‌های قالب‌گیری شده، آنها را در مدت زمانی بیش از ۲۰ ساعت و کمتر از ۴۸ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌کنند. سپس نمونه‌های از قالب باز شده را تا زمان رسیدن به زمان آزمایش، در رطوبت کامل و یا در آب آهک اشباع نگهداری می‌کنند. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن مشخص تحت سرعت بارگذاری معینی در دستگاه پرس تعیین می‌شود که از تقسیم حداکثر نیروی ثبت شده بر سطح مقطع نمونه به‌دست می‌آید. در استاندارد انگلستان، نمونه‌های مکعبی در قالب‌های فولادی و چدنی در ابعاد مشخص شده ریخته می‌شوند. استاندارد BS، پرکردن قالب را در لایه‌هایی با ضخامت تقریبی ۵ سانتی‌متر توصیه می‌کند و تراکم هر لایه در مکعب‌های ۱۵ سانتی‌متری با ۳۵ ضربه و در مکعب‌های

۱۰ سانتی‌متری با ۲۵ ضرب توسط یک میله‌ی فولادی با مقطع مربعی شکلی به ابعاد ۲۵ میلی‌متر، صورت می‌گیرد. روش‌های ارتعاشی دیگر نیز قابل استفاده است.

قبل از انجام آزمایشات اصلی، آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ و ۱۸۰ روز با شکستن ۳ نمونه از هر طرح در هر روز انجام گردید. نتایج آزمایشات مقاومت فشاری برای سنین مذکور در شکل ۳-۴ و جدول ۳-۴ آورده شده است.



شکل ۳-۴ چرب کردن قالب‌ها



جدول ۳-۴ نتایج آزمایشات مقاومت فشاری برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ و ۱۸۰ روز

No of Days	طرح اختلاط ۱	طرح اختلاط ۲	طرح اختلاط ۳	طرح اختلاط ۴
Speciment of 7 Days	۵۵/۷	۶۸/۱	۸۳/۶	۹۵/۳
Speciment of 28 DayS	۸۲/۵۶	۹۳/۶۱	۱۰۷/۶	۱۱۳/۶
Speciment of 90 Days	۱۰۱/۵	۱۱۳/۹	۱۲۰	۱۲۳/۱
Speciment of 180 Days	۱۰۹	۱۱۸/۷	۱۲۵/۹	۱۳۴/۱

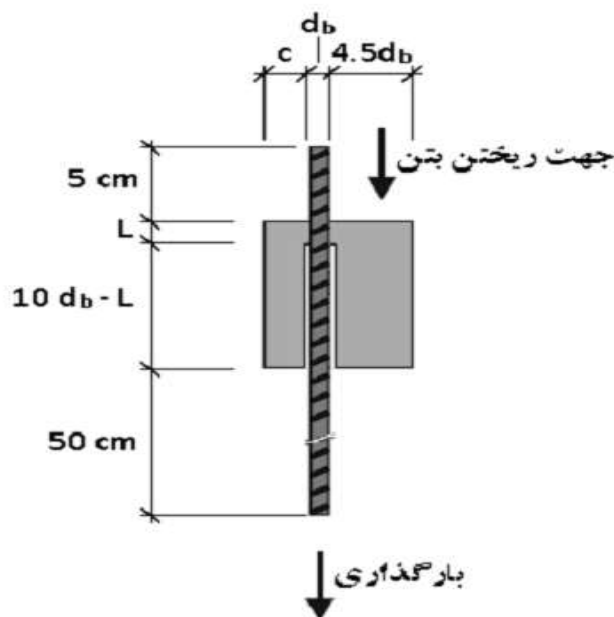


شکل ۴-۴ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری بتن

با استفاده از نانوسیلیس می‌توان وجوه هسته‌ای بیشتری را برای فرآورده‌های هیدراتاسیون ایجاد کرد و متعاقب آن با شکل‌گیری ساختار ژل پایدار، خواص مکانیکی خمیر سیمان سخت شده را با افزایش نانوسیلیس بهبود داد. همانطور که در شکل ۳-۴ مشخص است، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در همه سنین از نمونه شاهد بیشتر بوده و با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس مقاومت

فشاری افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت نسبت به طرح اختلاط ۱ حتی در سنین اولیه در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با ۴/۵ درصد و ۶/۵ درصد جایگزینی مشهود است.

پس از پایان یافتن اختلاط، قالب‌گیری بتن انجام شد. برای قالب‌گیری نمونه‌های ساخته شده براساس استاندارد RILEM از قالب فولادی مکعبی چوبی به ابعاد $12 \times 12 \times 12$ سانتی‌متر برای آرماتور نمره ۱۲ و ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای آرماتور نمره ۱۴ استفاده شد. در کف تمامی قالب‌ها سوراخی به اندازه قطر آرماتور و در فواصل d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ از لبه قالب ایجاد شد تا آرماتور از میان آن عبور کند. آرماتورها از بالا توسط سیم مفتولی همانند شکل ۴-۷ که بر روی قالب تعبیه شده بود مهار شدند. قبل از ریختن بتن درون قالب، آرماتور نسبت به کف قالب گونیا شدند. مشخصات هندسی این نمونه‌ها و نحوه قالب‌گیری این نمونه‌ها در شکل‌های ۴-۵، ۴-۶ و ۴-۷ آورده شده است.



شکل ۴-۵ مشخصات هندسی نمونه‌ها



شکل ۴-۶ قالب گیری نمونه های ساخته شده براساس استاندارد RILEM



شکل ۴-۷ قالب گیری نمونه های ساخته شده براساس استاندارد RILEM

در ساخت تمامی نمونه‌ها، بتن در دو لایه درون قالب ریخته شد که پس از ریختن هر لایه نمونه به مدت ۵۰ ثانیه بر روی میز ویبره (شکل ۴-۸) قرار داده شد.



شکل ۴-۸ میز ویبره استفاده شده برای متراکم کردن بتن فوق توانمند

لازم به ذکر است که در هر بار ساخت بتن، نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای مطابق شکل ۴-۹ جهت تعیین مقاومت فشاری بتن، از بتن ساخته شده گرفته شد.



شکل ۴-۹ نمونه برداری استوانه ای استاندارد

پس از گذشت ۲۴ ساعت از بتن‌ریزی نمونه‌ها قالب برداری شدند. در این پژوهش برای عمل‌آوری بتن فوق‌توانمند پس از قالب برداری، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز درون آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس تا زمان آزمایش بیرون کشیدگی در هوای آزاد قرار داده شدند (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰ عمل آوری نمونه ها درون آب ۲۰ درجه سانتی گراد

۴-۴ دستگاه آزمایش

نحوه بارگذاری و دستگاه آزمایش در شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲ نمایش داده شده است. بارگذاری به صورت کنترل بار انجام و مقدار بار در هر لحظه توسط Load Cell الکترونیکی قرائت می شود. LVDT قرارداده شده در انتهای آرماتور، مقدار لغزش آرماتور را اندازه گیری می کند. مقادیر قرائت شده به صورت خودکار توسط سیستم جمع آوری داده ها ذخیره می شوند. هنگامی که نمونه روی تکیه گاه قرار می گیرد و بار کششی به آرماتور اعمال می شود، در محل تماس نمونه و تکیه گاه تنش فشاری ایجاد می شود. وجود این تنش فشاری می تواند منجر به افزایش مقاومت پیوستگی و در نتیجه ایجاد خطا در نتایج آزمایش شود، به همین دلیل در نمونه های ساخته شده براساس استاندارد RILEM، بین ناحیه پیوستگی و محل تماس با تکیه گاه، فاصله ای در نظر گرفته شده است تا اثر فشار تکیه گاهی حذف شود. بدیهی است که در این فاصله بین بتن و آرماتور تماسی وجود ندارد.



شکل ۴-۱۱ دستگاه آزمایش



شکل ۴-۱۲ دستگاه آزمایش در حال تست نمونه

۴-۵ نتایج مربوط به تنش پیوستگی آرماتور ۱۲

خلاصه نتایج آزمایش نمونه‌های استاندارد RILEM در جداول زیر ارائه شده است. هر نمونه، ۳ بار و در ۳ روز متفاوت در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شد. در هر سه روز ساختن نمونه‌ها از بتن ساخته شده نمونه‌برداری شده و نتیجه مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن در جداول زیر آورده شده است. در جدول ۴-۴ برای مشخص نمودن سه نمونه هر رده، در انتهای اسم نمونه‌ها

سه عدد ۱، ۲ و ۳ قرار داده شده است. در هر یک از این جداول نتیجه آزمایش ۱۲ نمونه ارائه شده است.

در تمامی جدول‌های این فصل، u تنش پیوستگی، u_{av} تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه‌های مشابه، $u/\sqrt{f'_c}$ تنش پیوستگی متوسط نرمال شده و $(u/\sqrt{f'_c})_a$ تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه‌های مشابه در هر رده نمونه‌ها می‌باشد.

جدول ۴-۴ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R12C1L1-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۲	۱۲	۱۲	۷۰۲/۷۷	۱۵/۲۴
R12C1L1-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۲	۱۲	۱۲	۷۸۶/۲۴	۱۷/۰۵
R12C1L1-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۲	۱۲	۱۲	۶۹۰/۷۸	۱۴/۹۸
R12C2L2-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۲	۲۴	۲۴	۲۰۸۰/۶۵	۲۲/۵۶
R12C2L2-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۲	۲۴	۲۴	۲۳۳۵/۲	۲۵/۳۲
R12C2L2-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۲	۲۴	۲۴	۱۹۴۷/۸۵	۲۱/۱۲
R12C3L3-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۲	۳۶	۳۶	۳۹۰۲/۶۱	۲۸/۲۱
R12C3L3-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۲	۳۶	۳۶	۴۳۰۷/۹۵	۳۱/۱۴
R12C3L3-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۲	۳۶	۳۶	۳۷۱۷/۲۳	۲۶/۸۷
R12C4L4-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۲	۴۸	۴۸	۶۱۷۰/۰۲	۳۳/۴۵
R12C4L4-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۲	۴۸	۴۸	۶۶۷۹/۱۲	۳۶/۲۱
R12C4L4-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۲	۴۸	۴۸	۵۷۵۱/۳۱	۳۱/۱۸

جدول ۴-۵ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R12C1L1-1	d_b	۱۱۵/۲	۷۰۲/۷۷	۱۵/۲۴	۱۵/۷۶	۱/۴۲	۱/۴۶
R12C1L1-2		۱۲۰/۵	۷۸۶/۲۴	۱۷/۰۵		۱/۵۵	
R12C1L1-3		۱۱۲/۱	۶۹۰/۷۸	۱۴/۹۸		۱/۴۱	
R12C2L2-1	$2d_b$	۱۱۵/۲	۲۰۸۰/۶۵	۲۲/۵۶	۲۳	۲/۱	۲/۱۳
R12C2L2-2		۱۲۰/۵	۲۳۳۵/۲	۲۵/۳۲		۲/۳۱	
R12C2L2-3		۱۱۲/۱	۱۹۴۷/۸۵	۲۱/۱۲		۱/۹۹	
R12C3L3-1	$3d_b$	۱۱۵/۲	۳۹۰۲/۶۱	۲۸/۲۱	۲۸/۷۴	۲/۶۳	۲/۶۷
R12C3L3-2		۱۲۰/۵	۴۳۰۷/۹۵	۳۱/۱۴		۲/۸۴	
R12C3L3-3		۱۱۲/۱	۳۷۱۷/۲۳	۲۶/۸۷		۲/۵۴	
R12C4L4-1	$4d_b$	۱۱۵/۲	۶۱۷۰/۰۲	۳۳/۴۵	۳۳/۶۱	۳/۱۲	۳/۱۲
R12C4L4-2		۱۲۰/۵	۶۶۷۹/۱۲	۳۶/۲۱		۳/۳	
R12C4L4-3		۱۱۲/۱	۵۷۵۱/۳۱	۳۱/۱۸		۲/۹۴	

جدول ۴-۶ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R12C1L1-1	d_b	۱۱۰/۷	۵/۷۹	۱۲	۱۲	۱۲	۶۸۲/۳	۱۴/۸
R12C1L1-2		۱۰۸/۳	۵/۷۲	۱۲	۱۲	۱۲	۶۶۹/۵۷	۱۴/۵۲
R12C1L1-3		۱۰۷/۲	۵/۶۹	۱۲	۱۲	۱۲	۶۶۴/۰۴	۱۴/۴
R12C2L2-1	$2d_b$	۱۱۰/۷	۵/۷۹	۱۲	۲۴	۲۴	۲۰۰۴/۲۹	۲۱/۷۳
R12C2L2-2		۱۰۸/۳	۵/۷۲	۱۲	۲۴	۲۴	۱۹۷۷/۷۳	۲۱/۴۴
R12C2L2-3		۱۰۷/۲	۵/۶۹	۱۲	۲۴	۲۴	۱۹۴۲/۳۱	۲۱/۰۶

جدول ۴-۷ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R12C1L1-1	d_b	۱۱۰/۷	۶۸۲/۳	۱۴/۸	۱۴/۵۷	۱/۴۱	۱/۴
R12C1L1-2		۱۰۸/۳	۶۶۹/۵۷	۱۴/۵۲		۱/۴۰	
R12C1L1-3		۱۰۷/۲	۶۶۴/۰۴	۱۴/۴		۱/۳۹	
R12C2L2-1	$2d_b$	۱۱۰/۷	۲۰۰۴/۲۹	۲۱/۷۳	۲۱/۴۱	۲/۰۷	۲/۰۵
R12C2L2-2		۱۰۸/۳	۱۹۷۷/۷۳	۲۱/۴۴		۲/۰۶	
R12C2L2-3		۱۰۷/۲	۱۹۴۲/۳۱	۲۱/۰۶		۲/۰۳	

جدول ۴-۸ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R12C1L1-1	d_b	۹۵/۸	۵/۳۸	۱۲	۱۲	۱۲	۶۸۸/۹۴	۱۴/۹۴
R12C1L1-2		۹۲/۸	۵/۳	۱۲	۱۲	۱۲	۶۲۶/۴۱	۱۳/۵۸
R12C1L1-3		۹۰/۳	۵/۲۳	۱۲	۱۲	۱۲	۵۸۲/۱۴	۱۲/۶۲
R12C2L2-1	$2d_b$	۹۵/۸	۵/۳۸	۱۲	۲۴	۲۴	۱۸۷۹/۲۳	۲۰/۳۷۶
R12C2L2-2		۹۲/۸	۵/۳	۱۲	۲۴	۲۴	۱۷۸۲/۹۴	۱۹/۳۳
R12C2L2-3		۹۰/۳	۵/۲۳	۱۲	۲۴	۲۴	۱۷۵۶/۳۸	۱۹/۰۴

جدول ۴-۹ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه‌های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه‌های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R12C1L1-1	d_b	۹۵/۸	۶۸۸/۹۴	۱۴/۹۴	۱۳/۷۲	۱/۵۳	۱/۴۲
R12C1L1-2		۹۲/۸	۶۲۶/۴۱	۱۳/۵۸		۱/۴۱	
R12C1L1-3		۹۰/۳	۵۸۲/۱۴	۱۲/۶۲		۱/۳۳	
R12C2L2-1	$2d_b$	۹۵/۸	۱۸۷۹/۲۳	۲۰/۳۷۶	۱۹/۵۸	۲/۰۸	۲/۰۳
R12C2L2-2		۹۲/۸	۱۷۸۲/۹۴	۱۹/۳۳		۲/۰۱	
R12C2L2-3		۹۰/۳	۱۷۵۶/۳۸	۱۹/۰۴		۲	

جدول ۴-۱۰ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند بدون نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R12C1L1-1	d_b	۸۰/۲	۴/۹۳	۱۲	۱۲	۱۲	۶۲۰/۳۲	۱۳/۴۵
R12C1L1-2		۸۱/۳	۴/۹۶	۱۲	۱۲	۱۲	۶۳۲/۵	۱۳/۷۱
R12C1L1-3		۷۹/۸	۴/۹۱	۱۲	۱۲	۱۲	۵۶۹/۹۷	۱۲/۳۶
R12C2L2-1	$2d_b$	۸۰/۲	۴/۹۳	۱۲	۲۴	۲۴	۱۶۷۲/۲۷	۱۸/۱۳
R12C2L2-2		۸۱/۳	۴/۹۶	۱۲	۲۴	۲۴	۱۷۷۰/۷۷	۱۹/۲
R12C2L2-3		۷۹/۸	۴/۹۱	۱۲	۲۴	۲۴	۱۶۶۲/۳۱	۱۸/۰۲

جدول ۴-۱۱ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند بدون نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R12C1L1-1	d_b	۸۰/۲	۶۲۰/۳۲	۱۳/۴۵	۱۳/۱۸	۱/۵	۱/۴۷
R12C1L1-2		۸۱/۳	۶۳۲/۵	۱۳/۷۱		۱/۵۲	
R12C1L1-3		۷۹/۸	۵۶۹/۹۷	۱۲/۳۶		۱/۳۸	
R12C2L2-1	$2d_b$	۸۰/۲	۱۶۷۲/۲۷	۱۸/۱۳	۱۸/۴۵	۲/۰۲	۲/۰۶
R12C2L2-2		۸۱/۳	۱۷۷۰/۷۷	۱۹/۲		۲/۱۳	
R12C2L2-3		۷۹/۸	۱۶۶۲/۳۱	۱۸/۰۲		۲/۰۲	

۴-۶ نتایج مربوط به تنش پیوستگی آرماتور ۱۴

خلاصه نتایج آزمایش نمونه‌های استاندارد RILEM در جداول زیر ارائه شده است. هر نمونه، ۳ بار و در ۳ روز متفاوت در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شد. در جداول زیر برای مشخص نمودن سه نمونه هر رده، در انتهای اسم نمونه‌ها سه عدد ۱، ۲ و ۳ قرار داده شده است. در هر یک از این جداول نتیجه آزمایش ۱۲ نمونه ارائه شده است. در تمامی جدول‌های این فصل، u تنش پیوستگی، u_{ave} تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه‌های مشابه، $u/\sqrt{f'_c}$ تنش پیوستگی متوسط نرمال‌شده و $(u/\sqrt{f'_c})_a$ تنش پیوستگی متوسط نرمال‌شده میانگین برای نمونه‌های مشابه در هر رده نمونه‌ها می‌باشد.

جدول ۴-۱۲ مشخصات نمونه‌های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L1-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۱۴	۱۴	۹۶۰/۷۳	۱۵/۳۱
R14C1L1-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۱۴	۱۴	۹۹۵/۶۶	۱۵/۸۶
R14C1L1-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۱۴	۱۴	۹۳۴/۹۱	۱۴/۹۰
R14C2L2-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۲۸	۲۸	۲۸۱۶/۱۱	۲۲/۴۳
R14C2L2-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۲۸	۲۸	۲۹۰۱/۱۷	۲۳/۱۱
R14C2L2-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۲۸	۲۷۸۲/۶۹	۲۲/۱۷
R14C3L3-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۴۲	۴۲	۵۳۳۸/۳	۲۸/۳۵
R14C3L3-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۴۲	۴۲	۵۴۱۸/۰۴	۲۸/۷۷
R14C3L3-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۴۲	۴۲	۵۲۶۳/۱۱	۲۷/۹۵
R14C4L4-1	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۵۶	۵۶	۸۱۵۰/۶۱	۳۲/۴۶
R14C4L4-2	۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۵۶	۵۶	۸۲۱۷/۴۴	۳۲/۷۳
R14C4L4-3	۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۵۶	۵۶	۷۹۹۵/۶۸	۳۱/۸۵

جدول ۴-۱۳ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R14C1L1-1	d_b	۱۱۵/۲	۹۶۰/۷۳	۱۵/۳۱	۱۵/۳۵	۱/۴۳	۱/۴۳
R14C1L1-2		۱۲۰/۵	۹۹۵/۶۶	۱۵/۸۶		۱/۴۵	
R14C1L1-3		۱۱۲/۱	۹۳۴/۹۱	۱۴/۹۰		۱/۴۱	
R14C2L2-1	$2d_b$	۱۱۵/۲	۲۸۱۶/۱۱	۲۲/۴۳	۲۲/۵۷	۲/۰۹	۲/۱
R14C2L2-2		۱۲۰/۵	۲۹۰۱/۱۷	۲۳/۱۱		۲/۱۱	
R14C2L2-3		۱۱۲/۱	۲۷۸۲/۶۹	۲۲/۱۷		۲/۰۹	
R14C3L3-1	$3d_b$	۱۱۵/۲	۵۳۳۸/۳	۲۸/۳۵	۲۸/۳۶	۲/۶۴	۲/۶۳
R14C3L3-2		۱۲۰/۵	۵۴۱۸/۰۴	۲۸/۷۷		۲/۶۲	
R14C3L3-3		۱۱۲/۱	۵۲۶۳/۱۱	۲۷/۹۵		۲/۶۴	
R14C4L4-1	$4d_b$	۱۱۵/۲	۸۱۵۰/۶۱	۳۲/۴۶	۳۲/۳۵	۳/۰۲	۳
R14C4L4-2		۱۲۰/۵	۸۲۱۷/۴۴	۳۲/۷۳		۲/۹۸	
R14C4L4-3		۱۱۲/۱	۷۹۹۵/۶۸	۳۱/۸۵		۳/۰۱	

جدول ۴-۱۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانوسیلیس

نام نمونه		مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L1-1	d_b	۱۱۰/۷	۵/۷۹	۱۴	۱۴	۱۴	۹۳۲/۹	۱۴/۸۶
R14C1L1-2		۱۰۸/۳	۵/۷۲	۱۴	۱۴	۱۴	۸۹۴/۸	۱۴/۲۶
R14C1L1-3		۱۰۷/۲	۵/۶۹	۱۴	۱۴	۱۴	۸۸۸/۸۳	۱۴/۱۶
R14C2L2-1	$2d_b$	۱۱۰/۷	۵/۷۹	۱۴	۲۸	۲۸	۲۸۰۲/۴۲	۲۲/۳۲
R14C2L2-2		۱۰۸/۳	۵/۷۲	۱۴	۲۸	۲۸	۲۶۸۸/۸۹	۲۱/۴۲
R14C2L2-3		۱۰۷/۲	۵/۶۹	۱۴	۲۸	۲۸	۲۶۵۴/۵۴	۲۱/۱۵
R14C3L3-1	$3d_b$	۱۱۰/۷	۳۶	۱۴	۴۲	۴۲	۴۹۷۶/۶۹	۲۶/۴۳
R14C3L3-2		۱۰۸/۳	۳۶	۱۴	۴۲	۴۲	۴۹۲۵/۱۶	۲۶/۱۶
R14C3L3-3		۱۰۷/۲	۳۶	۱۴	۴۲	۴۲	۴۸۷۵/۸۶	۲۵/۸۹
R14C4L4-1	$4d_b$	۱۱۰/۷	۵/۷۹	۱۴	۵۶	۵۶	۷۲۳۰/۱۴	۲۸/۸
R14C4L4-2		۱۰۸/۳	۵/۷۲	۱۴	۵۶	۵۶	۷۲۰۰/۲۶	۲۸/۶۸
R14C4L4-3		۱۰۷/۲	۵/۶۹	۱۴	۵۶	۵۶	۷۱۷۰/۳۸	۲۸/۵۶

جدول ۴-۱۵ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R14C1L1-1	d_b	۱۱۰/۷	۹۳۲/۹	۱۴/۸۶	۱۴/۴۳	۱/۴۱	۱/۳۸
R14C1L1-2		۱۰۸/۳	۸۹۴/۸	۱۴/۲۶		۱/۳۷	
R14C1L1-3		۱۰۷/۲	۸۸۸/۸۳	۱۴/۱۶		۱/۳۷	
R14C2L2-1	$2d_b$	۱۱۰/۷	۲۸۰۲/۴۲	۲۲/۳۲	۲۱/۶۳	۲/۱۲	۲/۰۷
R14C2L2-2		۱۰۸/۳	۲۶۸۸/۸۹	۲۱/۴۲		۲/۰۶	
R14C2L2-3		۱۰۷/۲	۲۶۵۴/۵۴	۲۱/۱۵		۲/۰۴	
R14C3L3-1	$3d_b$	۱۱۰/۷	۴۹۷۶/۶۹	۲۶/۴۳	۲۶/۱۶	۲/۵۱	۲/۵۱
R14C3L3-2		۱۰۸/۳	۴۹۲۵/۱۶	۲۶/۱۶		۲/۵۱	
R14C3L3-3		۱۰۷/۲	۴۸۷۵/۸۶	۲۵/۸۹		۲/۵	
R14C4L4-1	$4d_b$	۱۱۰/۷	۷۲۳۰/۱۴	۲۸/۸	۲۸/۶۸	۲/۷۴	۲/۷۵
R14C4L4-2		۱۰۸/۳	۷۲۰۰/۲۶	۲۸/۶۸		۲/۷۶	
R14C4L4-3		۱۰۷/۲	۷۱۷۰/۳۸	۲۸/۵۶		۲/۷۶	

جدول ۴-۱۶ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L1-1	d_b	۹۵/۸	۵/۳۸	۱۴	۱۴	۱۴	۸۷۹/۱۲	۱۴/۰۱
R14C1L1-2		۹۲/۸	۵/۳	۱۴	۱۴	۱۴	۸۶۱/۹۴	۱۳/۷۳
R14C1L1-3		۹۰/۳	۵/۲۳	۱۴	۱۴	۱۴	۸۲۱/۶۱	۱۳/۰۹
R14C2L2-1	$2d_b$	۹۵/۸	۵/۳۸	۱۴	۲۸	۲۸	۲۵۹۹/۲۶	۲۰/۷۱
R14C2L2-2		۹۲/۸	۵/۳	۱۴	۲۸	۲۸	۲۵۳۶/۵۲	۲۰/۲۱
R14C2L2-3		۹۰/۳	۵/۲۳	۱۴	۲۸	۲۸	۲۴۰۵/۰۷	۱۹/۱۶
R14C3L3-1	$3d_b$	۹۵/۸	۵/۳۸	۱۴	۴۲	۴۲	۴۷۰۵/۵۶	۲۴/۹۹
R14C3L3-2		۹۲/۸	۵/۳	۱۴	۴۲	۴۲	۴۶۳۱/۶۲	۲۴/۶
R14C3L3-3		۹۰/۳	۵/۲۳	۱۴	۴۲	۴۲	۴۴۷۴/۷۷	۲۳/۷۶
R14C4L4-1	$4d_b$	۹۵/۸	۵/۳۸	۱۴	۵۶	۵۶	۶۸۷۱/۶۲	۲۷/۳۷
R14C4L4-2		۹۲/۸	۵/۳	۱۴	۵۶	۵۶	۶۵۷۲/۸۵	۲۶/۱۸
R14C4L4-3		۹۰/۳	۵/۲۳	۱۴	۵۶	۵۶	۶۴۲۳/۴۷	۲۵/۵۹

جدول ۴-۱۷ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۲/۵ درصد نانو سیلیس

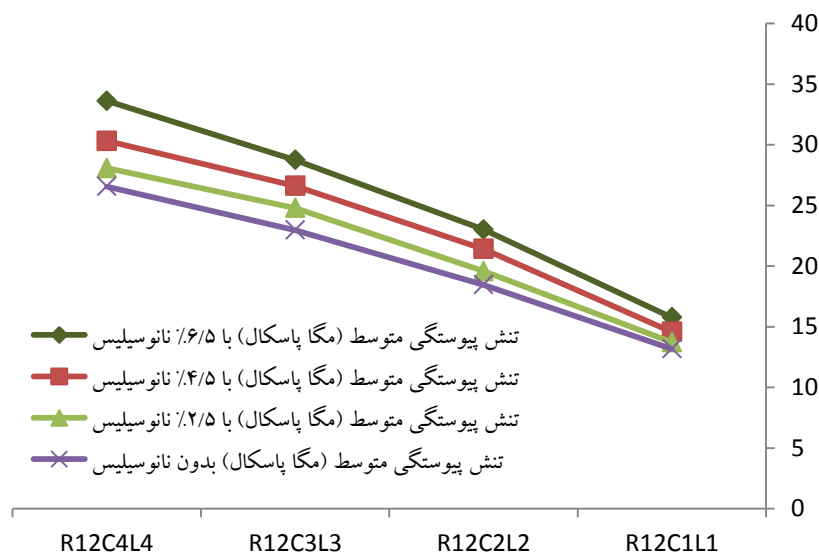
نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R14C1L1-1	۹۵/۸	۸۷۹/۱۲	۱۴/۰۱	۱۳/۶۱	۱/۴۳	۱/۴۱
R14C1L1-2	۹۲/۸	۸۶۱/۹۴	۱۳/۷۳		۱/۴۳	
R14C1L1-3	۹۰/۳	۸۲۱/۶۱	۱۳/۰۹		۱/۳۸	
R14C2L2-1	۹۵/۸	۲۵۹۹/۲۶	۲۰/۷۱	۲۰/۰۲	۲/۱۲	۲/۰۸
R14C2L2-2	۹۲/۸	۲۵۳۶/۵۲	۲۰/۲۱		۲/۱	
R14C2L2-3	۹۰/۳	۲۴۰۵/۰۷	۱۹/۱۶		۲/۰۲	
R14C3L3-1	۹۵/۸	۴۷۰۵/۵۶	۲۴/۹۹	۲۴/۴۵	۲/۵۵	۲/۵۴
R14C3L3-2	۹۲/۸	۴۶۳۱/۶۲	۲۴/۶		۲/۵۵	
R14C3L3-3	۹۰/۳	۴۴۷۴/۷۷	۲۳/۷۶		۲/۵۰	
R14C4L4-1	۹۵/۸	۶۸۷۱/۶۲	۲۷/۳۷	۲۶/۳۸	۲/۸۰	۲/۷۴
R14C4L4-2	۹۲/۸	۶۵۷۲/۸۵	۲۶/۱۸		۲/۷۲	
R14C4L4-3	۹۰/۳	۶۴۲۳/۴۷	۲۵/۵۹		۲/۶۹	

جدول ۴-۱۸ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند بدون نانوسیلیس

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L1-1	d_b	۸۰/۲	۴/۹۳	۱۴	۱۴	۱۴	۷۶۰/۷۲	۱۲/۱۲
R14C1L1-2		۸۱/۳	۴/۹۶	۱۴	۱۴	۱۴	۷۴۷/۱۷	۱۱/۹۰۴
R14C1L1-3		۷۹/۸	۴/۹۱	۱۴	۱۴	۱۴	۶۹۲/۹۴	۱۱/۰۴
R14C2L2-1	$2d_b$	۸۰/۲	۴/۹۳	۱۴	۲۸	۲۸	۲۲۳۹/۹۹	۱۷/۸۴۴
R14C2L2-2		۸۱/۳	۴/۹۶	۱۴	۲۸	۲۸	۲۱۲۴	۱۶/۹۲
R14C2L2-3		۷۹/۸	۴/۹۱	۱۴	۲۸	۲۸	۲۰۴۸/۶۸	۱۶/۳۲
R14C3L3-1	$3d_b$	۸۰/۲	۴/۹۳	۱۴	۴۲	۴۲	۴۲۷۰/۱۶	۲۲/۶۸
R14C3L3-2		۸۱/۳	۴/۹۶	۱۴	۴۲	۴۲	۴۱۴۴/۰۶	۲۲/۰۰۸
R14C3L3-3		۷۹/۸	۴/۹۱	۱۴	۴۲	۴۲	۴۰۱۵/۲۶	۲۱/۳۲۴
R14C4L4-1	$4d_b$	۸۰/۲	۴/۹۳	۱۴	۵۶	۵۶	۶۳۵۱/۹۱	۲۵/۳
R14C4L4-2		۸۱/۳	۴/۹۶	۱۴	۵۶	۵۶	۶۱۰۳/۳۶	۲۴/۳۱
R14C4L4-3		۷۹/۸	۴/۹۱	۱۴	۵۶	۵۶	۵۹۷۹/۰۸	۲۳/۸۱

جدول ۴-۱۹ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند بدون نانوسیلیس

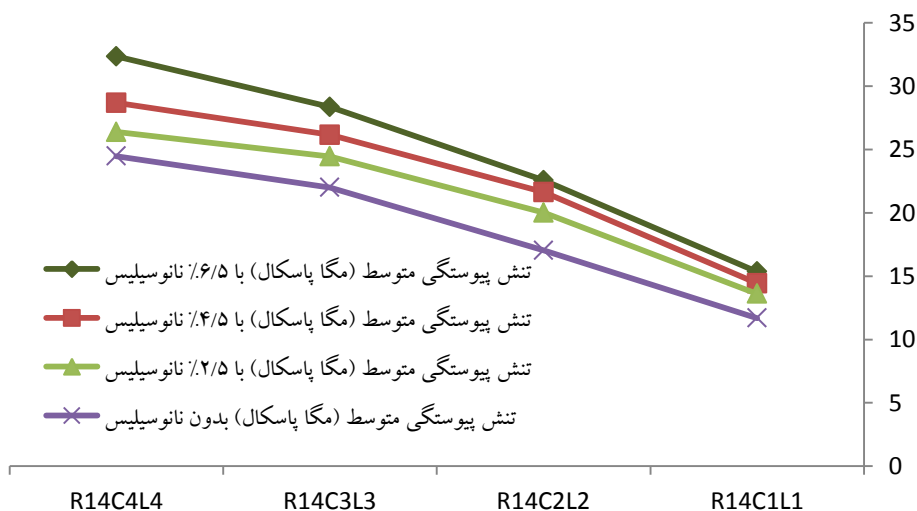
نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R14C1L1-1	d_b	۸۰/۲	۷۶۰/۷۲	۱۲/۱۲	۱۱/۶۹	۱/۳۵
R14C1L1-2		۸۱/۳	۷۴۷/۱۷	۱۱/۹۰۴		۱/۳۲
R14C1L1-3		۷۹/۸	۶۹۲/۹۴	۱۱/۰۴		۱/۲۴
R14C2L2-1	$2d_b$	۸۰/۲	۲۲۳۹/۹۹	۱۷/۸۴۴	۱۷/۰۳	۱/۹۹
R14C2L2-2		۸۱/۳	۲۱۲۴	۱۶/۹۲		۱/۸۸
R14C2L2-3		۷۹/۸	۲۰۴۸/۶۸	۱۶/۳۲		۱/۸۳
R14C3L3-1	$3d_b$	۸۰/۲	۴۲۷۰/۶	۲۲/۶۸	۲۲	۲/۵۳
R14C3L3-2		۸۱/۳	۴۱۴۴/۰۶	۲۲/۰۰۸		۲/۴۴
R14C3L3-3		۷۹/۸	۴۰۱۵/۲۶	۲۱/۳۲۴		۲/۳۹
R14C4L4-1	$4d_b$	۸۰/۲	۶۳۵۱/۹۱	۲۵/۳	۲۴/۴۸	۲/۸۳
R14C4L4-2		۸۱/۳	۶۱۰۳/۳۶	۲۴/۳۱		۲/۷
R14C4L4-3		۷۹/۸	۵۹۷۹/۰۸	۲۳/۸۱		۲/۶۷



شکل ۴-۱۳ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۲ با طول‌های پیوستگی، پوشش بتن و درصد

نانو سیلیس متفاوت

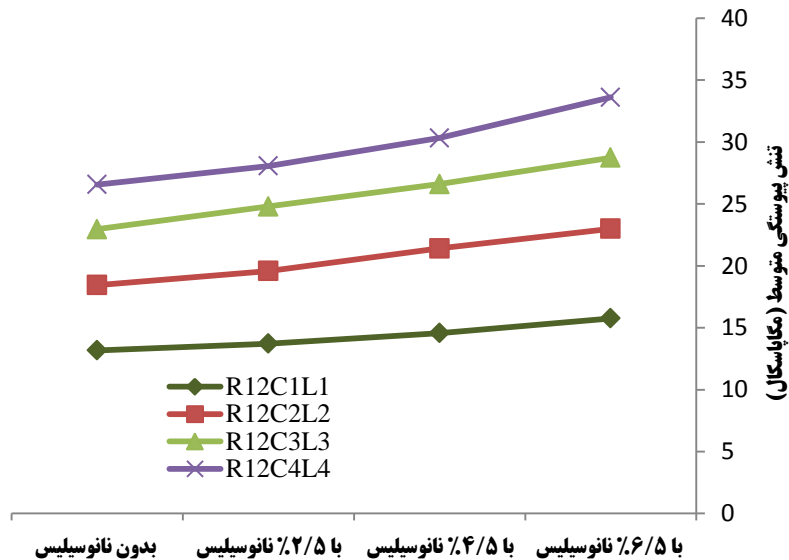
در شکل ۴-۱۳ تنش پیوستگی متوسط برای آرماتور شماره ۱۲ با طول‌های پیوستگی، پوشش بتن و درصد نانو سیلیس متفاوت نشان داده شد. همانطور که در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است با افزایش هم‌زمان طول پیوستگی و پوشش آرماتور به‌طور مساوی، تنش پیوستگی متوسط افزایش می‌یابد، همچنین تنش پیوستگی متوسط با افزایش درصد نانو سیلیس و در نتیجه افزایش مقاومت بتن، افزایش یافته است.



شکل ۴-۱۴ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با طول‌های پیوستگی، پوشش بتن و درصد

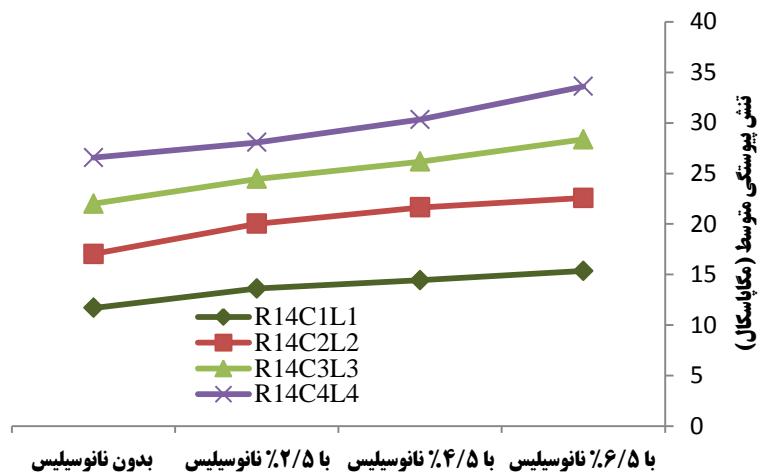
نانو سیلیس متفاوت

در شکل ۴-۱۴ تنش پیوستگی متوسط برای آرماتور شماره ۱۴ با طول‌های پیوستگی، پوشش بتن و درصد نانوسیلیس متفاوت نشان داده شد. همانطور که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است با افزایش هم‌زمان طول پیوستگی و پوشش آرماتور به‌طور مساوی، تنش پیوستگی متوسط افزایش می‌یابد، همچنین تنش پیوستگی متوسط با افزایش درصد نانوسیلیس و در نتیجه افزایش مقاومت بتن، افزایش یافته است.



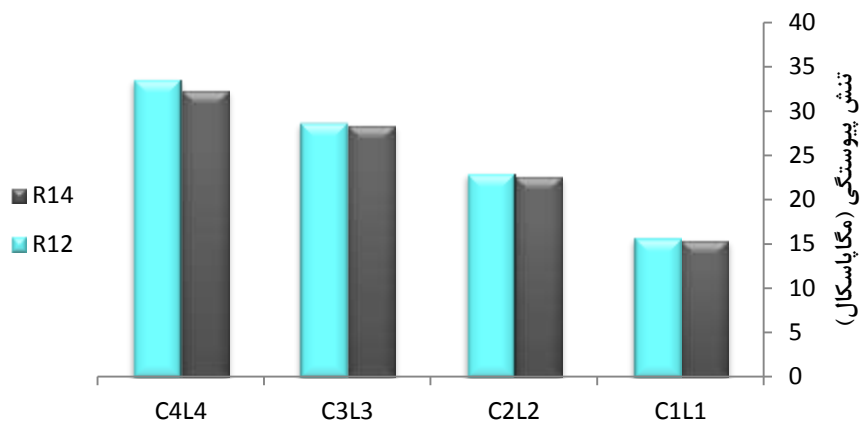
شکل ۴-۱۵ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۲ با درصد نانوسیلیس متفاوت

در شکل ۴-۱۵ تنش پیوستگی متوسط برای آرماتور شماره ۱۲ با درصد نانوسیلیس متفاوت نشان داده شد. همانطور که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است با کاهش درصد نانوسیلیس، تنش پیوستگی متوسط کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۶ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با درصد نانو سیلیس متفاوت

در شکل ۴-۱۶ تنش پیوستگی متوسط برای آرماتور شماره ۱۴ با درصد نانوسیلیس متفاوت نشان داده شد. همانطور که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است با کاهش درصد نانوسیلیس، تنش پیوستگی متوسط کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۷- تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۲ و ۱۴

در شکل ۴-۱۷ تنش پیوستگی متوسط برای دو آرماتور شماره ۱۲ و ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شماره آرماتور تنش پیوستگی متوسط کاهش یافته است.

۷-۴ بررسی طول پیوستگی و پوشش آرماتور به صورت جداگانه در تنش پیوستگی بتن و

آرماتور فولادی

در قسمت‌های قبل تاثیر هم‌زمان افزایش طول پیوستگی و پوشش آرماتور بر روی تنش پیوستگی بتن و آرماتور فولادی بررسی شد. در این قسمت با توجه به تاثیر هر یک از پارامترهای طول پیوستگی و پوشش آرماتور به‌تنهایی بر روی تنش پیوستگی بتن و آرماتورهای فولادی اثر هر یک از این دو پارامتر به‌تنهایی در جداول ۴-۱۹ الی ۴-۲۲ بررسی شده است.

همانطور که از نتایج این جداول مشخص است افزایش طول پیوستگی، منجر به کاهش تنش پیوستگی می‌شود و افزایش پوشش آرماتور تنش پیوستگی نهایی را افزایش می‌دهد.

در جداول ۴-۱۹ و ۴-۲۰ اثر افزایش طول پیوستگی بر تنش پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتور فولادی با پوشش آرماتور برابر $2d_b$ بررسی شده است. همانطور که مشخص است با افزایش طول

پیوستگی از d_b تا $4d_b$ مقدار تنش پیوستگی متوسط از مقدار $۲۲/۶۳$ تا $۲۱/۲۴$ $\frac{kgf}{mm^2}$ کاهش یافته است.

در جداول ۴-۲۱ و ۴-۲۲ اثر افزایش پوشش آرماتور بر تنش پیوستگی بتن فوق‌توانمند و آرماتور فولادی با طول پیوستگی برابر $2d_b$ بررسی شده است. همانطور که مشخص است با افزایش پوشش

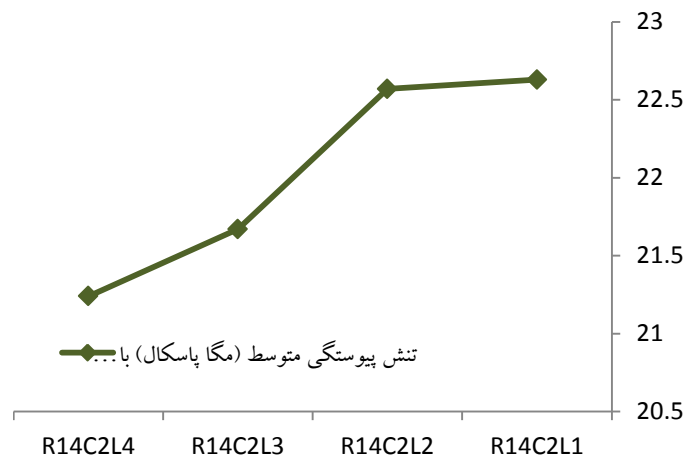
آرماتور از d_b تا $4d_b$ مقدار تنش پیوستگی متوسط از مقدار $۱۵/۶$ تا $۳۱/۳$ $\frac{kgf}{mm^2}$ افزایش یافته است.

جدول ۴-۲۰ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C2L1-1	d_b	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۲۸	۱۴	۱۴۱۹/۱۴	۲۲/۶۱
R14C2L1-2		۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۲۸	۱۴	۱۴۴۹/۸۹	۲۳/۱
R14C2L1-3		۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۱۴	۱۳۹۳/۴۰	۲۲/۲
R14C2L2-1	$2d_b$	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۲۸	۲۸	۲۸۱۶/۱۱	۲۲/۴۳
R14C2L2-2		۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۲۸	۲۸	۲۹۰۱/۱۷	۲۳/۱۱
R14C2L2-3		۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۲۸	۲۷۸۲/۶۹	۲۲/۱۷
R14C2L3-1	$3d_b$	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۲۸	۴۲	۴۰۶۷/۲۳	۲۱/۶
R14C2L3-2		۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۲۸	۴۲	۴۱۷۲/۵۵	۲۲/۱۶
R14C2L3-3		۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۴۲	۴۰۰۵/۱	۲۱/۲۷
R14C2L4-1	$4d_b$	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۲۸	۵۶	۵۳۳۸/۶۳	۲۱/۲۶
R14C2L4-2		۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۲۸	۵۶	۵۴۴۸/۰۸	۲۱/۷
R14C2L4-3		۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۵۶	۵۲۱۴/۶	۲۰/۷۷

جدول ۴-۲۱ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی

نام نمونه		مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R14C2L1-1	d_b	۱۱۵/۲	۱۴۱۹/۱۴	۲۲/۶۱	۲۲/۶۳	۲/۱۰۷	۲/۱۰۲
R14C2L1-2		۱۲۰/۵	۱۴۴۹/۸۹	۲۳/۱		۲/۱۰۴	
R14C2L1-3		۱۱۲/۱	۱۳۹۳/۴۰	۲۲/۲		۲/۰۹۷	
R14C2L2-1	$2d_b$	۱۱۵/۲	۲۸۱۶/۱۱	۲۲/۴۳	۲۲/۵۷	۲/۰۹	۲/۰۹۶
R14C2L2-2		۱۲۰/۵	۲۹۰۱/۱۷	۲۳/۱۱		۲/۱۰۵	
R14C2L2-3		۱۱۲/۱	۲۷۸۲/۶۹	۲۲/۱۷		۲/۰۹۴	
R14C2L3-1	$3d_b$	۱۱۵/۲	۴۰۶۷/۲۳	۲۱/۶	۲۱/۶۷	۲/۰۱۲	۲/۰۱۳
R14C2L3-2		۱۲۰/۵	۴۱۷۲/۵۵	۲۲/۱۶		۲/۰۱۹	
R14C2L3-3		۱۱۲/۱	۴۰۰۵/۱	۲۱/۲۷		۲/۰۰۹	
R14C2L4-1	$4d_b$	۱۱۵/۲	۵۳۳۸/۶۳	۲۱/۲۶	۲۱/۲۴	۱/۹۸۱	۱/۹۷۳
R14C2L4-2		۱۲۰/۵	۵۴۴۸/۰۸	۲۱/۷		۱/۹۷۷	
R14C2L4-3		۱۱۲/۱	۵۲۱۴/۶	۲۰/۷۷		۱/۹۶۲	



شکل ۴-۱۸ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با افزایش طول پیوستگی

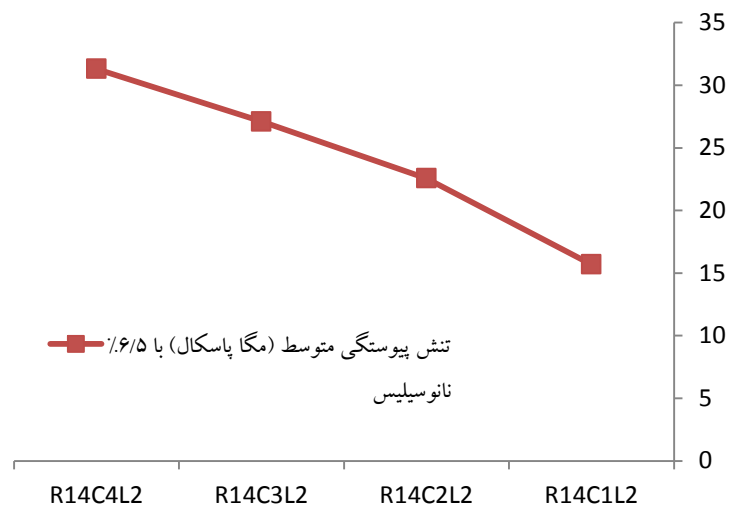
جدول ۴-۲۲ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی

نام نمونه	مقاومت کششی بتن f_{ct} مگا پاسکال	مقاومت فشاری بتن f'_c مگا پاسکال	d_b	پوشش بتن	طول پیوستگی	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L2-1	۵/۹	۱۱۵/۲	۱۴	۲۸	۱۴	۱۹۶۳/۷۸	۱۵/۶۴
R14C1L2-2	۶/۰۴	۱۲۰/۵	۱۴	۲۸	۱۴	۲۰۱۳/۸۳	۱۶/۰۴
R14C1L2-3	۵/۸۲	۱۱۲/۱	۱۴	۲۸	۱۴	۱۹۳۱/۹۹	۱۵/۳۹
R14C2L2-1	۵/۹	۱۱۵/۲	۱۴	۲۸	۲۸	۲۸۱۶/۱۱	۲۲/۴۳
R14C2L2-2	۶/۰۴	۱۲۰/۵	۱۴	۲۸	۲۸	۲۹۰۱/۱۷	۲۳/۱۱
R14C2L2-3	۵/۸۲	۱۱۲/۱	۱۴	۲۸	۲۸	۲۷۸۲/۶۹	۲۲/۱۷
R14C3L2-1	۵/۹	۱۱۵/۲	۱۴	۲۸	۴۲	۳۳۵۰/۸۷	۲۶/۶۹
R14C3L2-2	۶/۰۴	۱۲۰/۵	۱۴	۲۸	۴۲	۳۴۹۰/۷۴	۲۷/۸۱

R14C3L2-3		۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۴۲	۳۳۶۶/۸۸	۲۶/۸۲
R14C4L2-1	4d _b	۱۱۵/۲	۵/۹	۱۴	۲۸	۵۶	۳۹۱۸/۱۴	۳۱/۲۱
R14C4L2-2		۱۲۰/۵	۶/۰۴	۱۴	۲۸	۵۶	۴۰۰۷/۲۶	۳۱/۹۲
R14C4L2-3		۱۱۲/۱	۵/۸۲	۱۴	۲۸	۵۶	۳۸۶۵/۰۷	۳۰/۷۹

جدول ۴-۲۳ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس با در نظر گرفتن افزایش طول پیوستگی

نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	نیروی پیوستگی kg	تنش پیوستگی u $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی متوسط میانگین برای نمونه‌های مشابه u_{ave}	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده $u/\sqrt{f'_c}$	تنش پیوستگی متوسط نرمال شده میانگین برای نمونه های مشابه $(u/\sqrt{f'_c})_a$
R14C1L2-1	d _b	۱۱۵/۲	۱۹۶۳/۷۸	۱۵/۶۴	۱/۴۵۸	۱/۴۵۷
R14C1L2-2		۱۲۰/۵	۲۰۱۳/۸۳	۱۶/۰۴	۱/۴۶۱	
R14C1L2-3		۱۱۲/۱	۱۹۳۱/۹۹	۱۵/۳۹	۱/۴۵۴	
R14C2L2-1	2d _b	۱۱۵/۲	۲۸۱۶/۱۱	۲۲/۴۳	۲/۰۹	۲/۰۹۶
R14C2L2-2		۱۲۰/۵	۲۹۰۱/۱۷	۲۳/۱۱	۲/۱۰۵	
R14C2L2-3		۱۱۲/۱	۲۷۸۲/۶۹	۲۲/۱۷	۲/۰۹۴	
R14C3L2-1	3d _b	۱۱۵/۲	۳۳۵۰/۸۷	۲۶/۶۹	۲/۴۸۷	۲/۵۱۷
R14C3L2-2		۱۲۰/۵	۳۴۹۰/۷۴	۲۷/۸۱	۲/۵۳۳	
R14C3L2-3		۱۱۲/۱	۳۳۶۶/۸۸	۲۶/۸۲	۲/۵۳۳	
R14C4L2-1	4d _b	۱۱۵/۲	۳۹۱۸/۱۴	۳۱/۲۱	۲/۹۰۸	۲/۰۹۸
R14C4L2-2		۱۲۰/۵	۴۰۰۷/۲۶	۳۱/۹۲	۲/۰۹۸	
R14C4L2-3		۱۱۲/۱	۳۸۶۵/۰۷	۳۰/۷۹	۲/۰۹۸	



شکل ۴-۱۹ تنش پیوستگی متوسط آرماتور شماره ۱۴ با افزایش پوشش آرماتور

۴-۸ اصلاح رابطه تنش پیوستگی موضعی

در این قسمت، رابطه تنش پیوستگی موضعی اصفهانی و رنگان^۱ برای بتن فوق توانمند مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج محاسبه تنش پیوستگی موضعی با استفاده از رابطه ۳-۶ در جدول زیر ارائه شده است.

¹ Esfahani & Rangan

جدول ۴-۲۴ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	تنش پیوستگی حاصل از مطالعه آزمایشگاهی $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی حاصل از رابطه ۳-۶ $\frac{kgf}{mm^2}$	$\frac{u_{c-6-3}}{u_{c-exp}}$	تنش پیوستگی حاصل از رابطه ۴-۵ $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L1-1	۱۱۵/۲	۱۵/۳۱	۱۱/۷۲	۰/۷۶۵۵	۱۵/۳۳
R14C1L1-2	۱۲۰/۵	۱۵/۸۶	۱۱/۹۸	۰/۷۵۵۳	۱۵/۶۸
R14C1L1-3	۱۱۲/۱	۱۴/۹۰	۱۱/۵۶	۰/۷۷۵۸	۱۵/۱۲
R14C2L2-1	۱۱۵/۲	۲۲/۴۳	۱۶/۹۲	۰/۷۵۴۳	۲۲/۰۷
R14C2L2-2	۱۲۰/۵	۲۳/۱۱	۱۷/۳۱	۰/۷۴۹۰	۲۲/۵۷
R14C2L2-3	۱۱۲/۱	۲۲/۱۷	۱۶/۶۹	۰/۷۵۲۸	۲۱/۷۷
R14C3L3-1	۱۱۵/۲	۲۸/۳۵	۲۰/۹	۰/۷۳۷۲	۲۷/۱۹
R14C3L3-2	۱۲۰/۵	۲۸/۷۷	۲۱/۳۸	۰/۷۴۳۱	۲۷/۸۱
R14C3L3-3	۱۱۲/۱	۲۷/۹۵	۲۰/۶۲	۰/۷۳۷۷	۲۶/۸۲
R14C4L4-1	۱۱۵/۲	۳۲/۴۶	۲۴/۰۵	۰/۷۴۰۹	۳۱/۲۱
R14C4L4-2	۱۲۰/۵	۳۲/۷۳	۲۴/۵۹	۰/۷۵۱۲	۳۱/۹۲
R14C4L4-3	۱۱۲/۱	۳۱/۸۵	۲۳/۷۲	۰/۷۴۴۷	۳۰/۷۹
میانگین		۲۴/۶۵	۱۸/۴۵	۰/۷۵	۲۴/۰۲۴

جدول ۴-۲۵ مشخصات نمونه های حاوی بتن فوق توانمند با ۴/۵ درصد نانو سیلیس

نام نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن f'_c مگا پاسکال	تنش پیوستگی حاصل از مطالعه آزمایشگاهی $\frac{kgf}{mm^2}$	تنش پیوستگی حاصل از رابطه ۳-۶ $\frac{kgf}{mm^2}$	$\frac{u_{c-6-3}}{u_{c-exp}}$	تنش پیوستگی حاصل از رابطه ۴-۵ $\frac{kgf}{mm^2}$
R14C1L1-1	۱۱۰/۷	۱۴/۸۶	۱۱/۴۸	۰/۷۷۲۶	۱۵/۰۳
R14C1L1-2	۱۰۸/۳	۱۴/۲۶	۱۱/۳۶	۰/۷۹۶۸	۱۴/۸۷
R14C1L1-3	۱۰۷/۲	۱۴/۱۶	۱۱/۳	۰/۷۹۸۰	۱۴/۷۹
R14C2L2-1	۱۱۰/۷	۲۲/۳۲	۱۶/۵۹	۰/۷۴۳۰	۲۱/۶۳
R14C2L2-2	۱۰۸/۳	۲۱/۴۲	۱۶/۴۱	۰/۷۶۶۰	۲۱/۴
R14C2L2-3	۱۰۷/۲	۲۱/۱۵	۱۶/۳۲	۰/۷۷۱۹	۲۱/۲۹
R14C3L3-1	۱۱۰/۷	۲۶/۴۳	۲۰/۴۹	۰/۷۷۵۳	۲۶/۶۵
R14C3L3-2	۱۰۸/۳	۲۶/۱۶	۲۰/۲۷	۰/۷۷۴۹	۲۶/۳۶
R14C3L3-3	۱۰۷/۲	۲۵/۸۹	۲۰/۱۷	۰/۷۷۸۷	۲۶/۲۳
R14C4L4-1	۱۱۰/۷	۲۸/۸	۲۳/۵۷	۰/۸۱۸۵	۳۰/۱۶
R14C4L4-2	۱۰۸/۳	۲۸/۶۸	۲۳/۳۲	۰/۸۱۳۰	۳۰/۲۶
R14C4L4-3	۱۰۷/۲	۲۸/۵۶	۲۳/۲۰	۰/۸۱۲۲	۳۰/۱۱
میانگین		۲۲/۷۲	۱۷/۸۷	۰/۷۸۵	۲۳/۲۶

برای اصلاح رابطه ۳-۶، از مقدار اولیه f_b استفاده می شود.

$$f_b = \frac{\frac{c}{d_b} + 0.5}{1.75} f_{ct}$$

۱-۴

که در رابطه ۴-۱، c حداقل پوشش بتنی روی آرماتور، d_b قطر آرماتور، $f'_{ct} = 0.55\sqrt{f'_c}$ مقاومت کششی بتن و f'_c مقاومت فشاری بتن می‌باشد. با قرار دادن رابطه ۴-۱ در فرم کلی رابطه ۳-۶ داریم:

$$u_c = 1.75(c_1 \times \frac{f_b}{\left(\frac{c}{d_b} + c_2\right)}) \quad 2-4$$

که در رابطه فوق c_1 و c_2 ضرایب ثابت هستند. رابطه ۴-۲ قابل ساده‌سازی به رابطه زیر خطی است.

$$\frac{c}{d_b} = 1.75 \times c_1 \times \left(\frac{f_b}{u_c}\right) - c_2 \quad 3-4$$

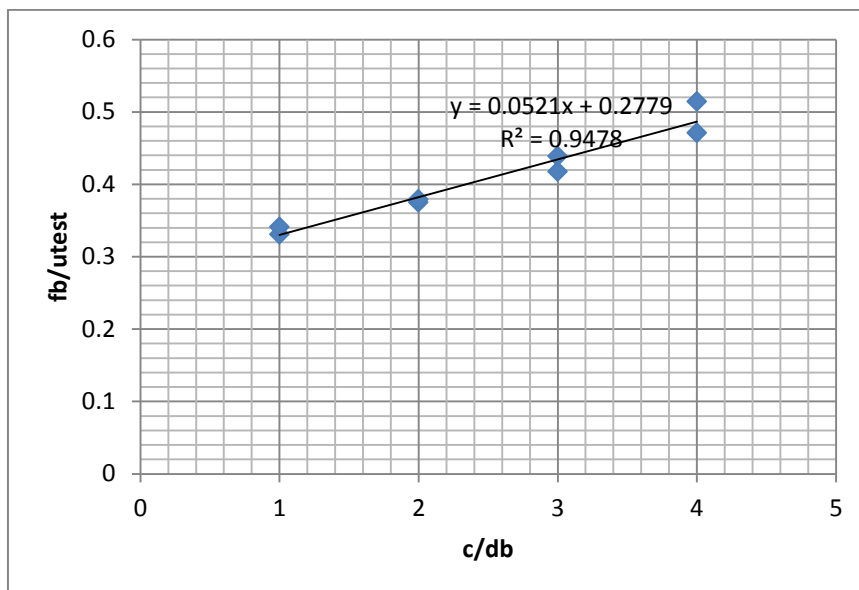
مقادیر $\frac{f_b}{u_{test}}$ و $\frac{c}{d_b}$ برای نمونه‌ها محاسبه شده و پس از میانگین‌گیری در هر رده در شکل زیر ترسیم شده است. رابطه خط برازش شده به داده‌ها به صورت زیر است.

$$\frac{f_b}{u_c} = 0.0521 \frac{c}{d_b} + 0.2779 \quad 4-4$$

با استفاده از رابطه ۴-۴ رابطه ۳-۶ به صورت زیر برای بتن فوق توانمند اصلاح می‌شود.

$$u_c = 10.967 \frac{\frac{c}{d_b} + 0.5}{\frac{c}{d_b} + 5.3339} f_{ct} : f'_c > 110Mpa \quad 5-4$$

نتایج مربوط به تنش پیوستگی برای نمونه‌های حاوی بتن فوق توانمند با ۶/۵ درصد نانوسیلیس و ۴/۵ درصد نانوسیلیس مربوط به رابطه ۴-۵ به ترتیب در جداول ۴-۱۱ و ۴-۱۲ آورده شده است.



شکل ۴-۲۰ ترسیم مقادیر $\frac{f_b}{u_{test}}$ در مقابل $\frac{c}{d_b}$ حاصل از آزمایش برای آرماتور شماره ۱۴ و بتن

حاوی ۴/۵ درصد و ۶/۵ درصد نانوسیلیس

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق توانمند و آرماتورهای فولادی برای درک بهتر رفتار آنها پرداختیم. از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، می توان به نتایج مهم زیر اشاره نمود:

۱- با افزایش طول پیوستگی از d_b تا $4d_b$ مقدار تنش پیوستگی متوسط از مقدار $۲۲/۶۳$ تا $۲۱/۲۴ \frac{kgf}{mm^2}$ کاهش یافته است.

۲- با افزایش پوشش آرماتور از d_b تا $4d_b$ مقدار تنش پیوستگی متوسط از مقدار $۱۵/۶$ تا $۳۱/۳ \frac{kgf}{mm^2}$ افزایش یافته است.

۳- تنش پیوستگی نهایی و تنش پیوستگی متوسط در مورد آرماتور شماره ۱۲ بیشتر از آرماتور شماره ۱۴ است.

۴- با افزودن نانوسیلیس به بتن فوق توانمند، تنش پیوستگی نهایی نرمال شده افزایش یافته است.

۵- افزایش طول پیوستگی، منجر به کاهش تنش پیوستگی می شود و افزایش پوشش آرماتور تنش پیوستگی نهایی را افزایش می دهد.

۶- افزایش هم زمان طول پیوستگی، پوشش آرماتور به مقدارهای d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ منجر به افزایش تنش پیوستگی متوسط می شود.

۷- افزایش هم زمان طول پیوستگی، پوشش آرماتور به مقدارهای d_b ، $2d_b$ ، $3d_b$ و $4d_b$ تنش پیوستگی متوسط نهایی را افزایش می دهد.

۸- رابطه تنش پیوستگی به صورت زیر برای بتن فوق توانمند اصلاح می شود.

$$u_c = 10.967 \frac{\frac{c}{d_b} + 0.5}{\frac{c}{d_b} + 5.3339} f_{ct} : f'_c \succ 110 \text{Mpa}$$

۲-۵ پیشنهادات برای کارهای تحقیقاتی آتی

با توجه به بررسی‌های انجام شده هنوز موارد متعددی جهت بررسی و مطالعه آزمایشگاهی و عددی وجود دارد، که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- در کنار تحقیق صورت گرفته می‌توان متغیرهایی چون: ابعاد، طول و یا شکل سطح مقطع نمونه‌ها، قطر فولاد و... را در نظر گرفت.

۲- استفاده از فولاد با مقاومت‌های مختلف جهت تعیین تنش پیوستگی آرماتور فولادی و بتن فوق‌توانمند

۳- استفاده از طرح‌های اختلاط دیگر محققین جهت ساختن بتن فوق‌توانمند

۴- بررسی تنش پیوستگی آرماتور فولادی و انواع بتن

مراجع:

- [1] حسنی، م.، اصفهانی، م.، "خصوصیات مکانیکی بتن فوق توانمند خود تراکم" پنجمین کنفرانس ملی بتن ایران، ۱۳۹۲.
- [2] جعفرزاده ایمن آبادی، غ.، تن زاده، ج.، ترابی خداشهری، ح.، میرزائی شاهخالی، م.، ۱۳۹۴، "ارزیابی میزان اثر الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی بتن فوق توانمند حاوی نانوسیلیس و دوده سیلیسی" اولین کنفرانس مهندسی عمران، رهاوردهای جدید، توسعه اقتصادی، فرهنگی و مدیریت جهادی.
- [3] چهکندی، س.، میری، م.، گیوه چی، م.، ۱۳۹۰، "بررسی دوام بتن خود تراکم حاوی نانوسیلیس در مجاورت آب دریا و اثرات جزر و مدی." ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- [4] رخشانی مهر، م.، اصفهانی، م.ر.، سازگاران، ب.، خوانیگی، س.م.ا.، ۱۳۹۰، پیوستگی بتن فوق توانمند (UHPC) و آرماتور فولادی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.
- [5] رمضانپور، ع.ا.، فیروزمکان، ش.، عبادی، ت.، بهرامی، ح.، ۱۳۹۰، "تاثیر نانوسیلیس بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن." ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- [6] مظلوم، م.، مومنی، ک.، ۱۳۹۳، پیوستگی میلگردهای فولادی و پلیمری در بتن های خود تراکم، نشریه علمی-پژوهشی امیر کبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)، ۱۰۱-۱۱۶.
- [7] Allena, S., "Ultra-High Strength Concrete Using Local Materials", New Mexico State University, New Mexico, 2010.
- [8] Abrams, D.A., 1913, "Tests of Bond Between Concrete and Steel", University of Illinois Bulletin, No.71, University of Illinois, USA.
- [9] ACI Committee 408, 2003, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bar in Tension (ACI 408R-03)", American Concrete Institute.
- [10] ACI Committee 226, 1987, "Silica Fume in Concrete", ACI Materials Journal, V.84, No.2, PP.158-166.
- [11] ACI Committee 318, 2002, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (318R-02)", American Concrete Institute, 443PP.

- [12] Aitcin, P.C., 2003, "The Durability Characteristics of High performance Concrete: A Review", *Cement and Concrete Composites*, V.25, NO.4-5, pp.409-420.
- [13] Aitcin, P.C., Lachemi, M., Adeline, R., Richard, P., 1998, "The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge", *Structural Engineering International (IABSE)*, V.8, No.2, pp.140-144.
- [14] Akashi, J., Fujii, S., Morita, S., 1993, "Bond-Slip Behavior of Deformed Bars in High Strength Concrete", *First Meeting of the Multi-lateral Project on the use of High Strength (Translated from Proceedings of Hapan Concrete Institute, Vol.13, No.2, 1991) Topic 1, Kyoto, Japan, PP.2-13.*
- [15] American Concrete Institute-Committee 440, 2003, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Rebars, ACI 440.IR-03", ACI, Farmington Hills, MI, USA.
- [16] Anderson, D., Roy, A., Seals, R.K., Cartledge, F.K., Akhter, H.M., Jones, S.C., 2000, "A Preliminary Assessment of the Use of an Amorphous Silica Residual as a Supplementary Cementing Material", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.3, PP.437-445.
- [17] ASTM C234-91a, "Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel", *ASTM Annual Book of Standards, Section 4, Construction, Philadelphia.*
- [18] Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E., Ghosh, S.K., 1999, "Behavior of Spliced Reinforcing Bars Embedded in High Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, V.96, No.5, Sept.-Oct., PP.826-835.
- [19] Azizinamini, A., Chisla, M., Ghosh, S.K., 1995, "Tension Development Length of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete", *Engineering Structures*, 17(7).
- [20] Barham, S., Darwin, D., 1999, "Effects of Aggregate Type, Water-to-Cementitious Material Ratio, and Age on Mechanical and Fracture Properties of Concrete", *SM Report No.56, University of Kansas Center for Research, Lawrence, Kans., 95PP.*

- [21] Belkowitz, J.S., Armentrout, D., 2010, "An Investigation of Nano Silica in the Cement Hydration Process", National Ready Mixed Concrete Association, Concrete Sustainability Conference.
- [22] Blais, P., Couture, M., 1999, "Precast, Prestressed Pedestrian Bridge-World's First Reactive Powder Concrete Structure", PCI Journal, V.44, No.5, September-October, PP.60-71.
- [23] Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aitcin, P., 1997, "Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concrete", ACI Materials Journal, V.94, No.4, July-August, PP.286-290.
- [24] Bonneau, O., Vernet, C., Dugat, J., Richard, P., Aitcin, P.C., 1996, "Reactive Powder Concretes: From Theory to Practice", Concrete International, PP.47-49.
- [25] Bonneau, O., Vernet, C., Moranville, M., Aitcin, P.C., 2000, "Characterization of the Granular Packing and Percolation Threshold of Reactive Powder Concrete" Cement and Concrete Research, V.30, No.12, PP.1861-1867.
- [26] CEB Task Group VI, 1981, "Bond Action Behaviour of Reinforcement-State-of-the-Art Report", Dec., 153PP.
- [27] Chan, Y., Chu, S., 2004, "Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete Research, V.34, No.7, PP.1167-1172.
- [28] Chan, Y.W., Chen, Y.S., Liu, Y.S., 2003, "Development of Bond Strength of Reinforcing Steel in Self-Consolidation Concrete", ACI Structural Journal, V.100, No.4, PP.490-498.
- [29] Chinn, J., Ferguson, P.M., Thompson, J.N., 1955, "Lapped Splices in Reinforced Concrete Beams", Journal of the American Concrete Institute, V.52, No.10, PP.201-213.
- [30] Clark, A.P., 1946, "Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bars", ACI Journal, Proceedings V.43, No.4, Dec., PP.381-400.
- [31] Darwin, D., Tholen, M.L., Idun, E.K., Zuo, J., 1996, "Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars", ACI Structural Journal, V.93, No.1, Jan-Feb., PP.95-107.

- [32] Darwin, D., Tholen, M.L., Idun, E.K., 1996, "Development Length Criteria for Conventional and High Relative Rib Area Reinforcing Bars", ACI Structural Journal, V.93, No.3, May-June, PP.347-359.
- [33] Darwin, D., Graham, E.K., 1993, "Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars", ACI Structural Journal, V.90, No.6, PP.646-657.
- [34] Darwin, D., Zuo, J., Tholen, M.L., Idun, E.K., 1996, "Development length criteria for conventional and high relative rib area reinforcing bars", ACI Structural Journal, V.93, No.3, PP.347-359.
- [35] Dotto, J.M.R., Deabreu, A.G., Dalmolin, D.C.C., Muller, I.L., 2004, "Influence of Silica Fume Addition on Concrete Physical Properties and on Corrosion Behaviour of Reinforcement Bars", Cement and Concrete Composites, Vol. 26, No.1, PP.31-39.
- [36] Droll K., 2004, "Influence of Additions on Ultra High Performance Concretes- Grain Size Optimization", Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, September 13-15, pp.285-301.
- [37] Engstrom, B., Magnusson, J., Huang, Z., 1998, "Pull-out Bond Behavior of Ribbed Bars in Normal and High Strength Concrete", ACI International-Bond and Development of Reinforcement, AC-SP180, PP.215-242.
- [38] Esfahani, M.R., Kianoush, M.R., 2005, "Development/splice length"
- [39] Esfahani, M.R., Rangan, B.V., 1998, "Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC)", ACI Structural Journal, reinforcing bars", ACI Structural Journal, V.102, No.1. V.95, No.2, Mar.-Apr., PP.96-106.
- [40] Esfahani, M.R., Rangan, B.V., 1998, "Bond between normal strength and high-strength concrete and reinforcing bars in splices in beams", ACI Structural Journal, V.95, No.3, PP.272-280.
- [41] Esfahani, M.R., Lachemi, M., Kianoush, M.R., 2008, "Top-Bar Effect of Steel Bars in Self Consolidating Concrete (SCC)", Journal of Cement and Concrete Composites, V.30, No.1.

- [42] Esfahani, M.R., Rangan, B.V., 2000, "Influence of Transverse Reinforcement on Bond Strength of Tensile Splices", *Cement and Concrete Composites*, V.22, PP.159-163.
- [43] Esfahani, M.R., 1999, "Discussion of Bond Strength of Reinforcement in High-Performance Concrete: Role of Silica Fume, Casting Position, and Superplasticizer Dosage", by Hamad and Itani, *ACI Materials Journal*, V.96, No.4., PP.510-511.
- [44] Esfahani, M.R., "Effect of Silica Fume, Superplasticizer and Concrete Strength on Steel-Concrete Bond", *Proceedings of the Third International Conference on Concrete Under Server Conditions*, Vancouver, Canada, June 2001, PP.1303-1310.
- [45] Esfahani, M.R., Vijaya Rangan, B., 1996, "Studies on Bond between Concrete and Reinforcing Bars", School of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia, 315 PP.
- [46] Fehling, E., Bunje, K., Leutbecher, T., 2004, "Design Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete", *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel University Press, Kassel, Germany, pp.327-338.
- [47] Ferguson, P.M., Turpin, R.D., Thompson, J.N., 1954, "Minimum Bar Spacing as a Function of Bond and Shear Strength", *ACI Structural Journal*, V.50, No.6, PP.869-887.
- [48] Ferguson, P.M., Thompson, J.N., 1962, "Development Length of High Strength Reinforcing Bars in Bond", *Proc. American Concrete Institute* 59, PP.887-992.
- [49] Ferguson, P.M., Breen, J.E., Thompson, J.N., 1965, "Pull-Out tests on high-strength reinforcing bars", *Journal of the American Concrete Institute*, V62, No.8, PP.933-949.
- [50] Firas, S.A., Gilles, F. Robert, L., 2010, "Bond between carbon fiber-reinforced Polymer (CFRP) bars and ultra high Performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): Experimental Study", *Construction and Building Materials*, V.25, No.2, PP.479-485.
- [51] Goto, and Yukimasa, 1971, "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars", *ACI Journal, Proceedings* V.68, No.4, Apr., PP.244-251.

- [52] Graybeal, B.A., 2005, "Characterization of the Behavior of Ultra-High Performance Concrete", Ph.D Dissertation, University of Maryland, College Park, Maryland.
- [53] Graybeal, B., 2006, "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete", Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HRT-06-103.
- [54] Graybeal, B., 2009, "Structural Behavior of a Prototype Ultra-High Performance Concrete Pi-Girder", Report No.PB2009-115495, National Technical Information Service, Springfield.
- [55] graybeal, B., 2007, "Compressive Behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced concrete" ACI Materials Journal, V.104, No.2, PP.146-152.
- [56] Graybeal, B., Tanesi, J., 2007, "Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V.19, No. 10, PP.848-854.
- [57] Habet, K., Viviani, M., Denarie, E., Bruhwiler, E., 2006, "Development of the mechanical Properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC)", Cement Concrete Research, V.36, No.7, PP.1362-1370.
- [58] Hasen, L.P., 2003, "Building system with joints of high-strength reinforced concrete", Proceedings of the 2nd International Conference on structural and Construction Engineering: System-based Vision for Strategic and Creative Design, Rome, V.2, PP.1097-1102.
- [59] Hegeer, J., Tuchlinski, D., Commer, B., 2004, "Bond Anchorage Behavior and shear Capacity of Ultra High Performance Concrete Beams", Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, September 13-15, PP.351-360.
- [60] Holschemacher, K., WeiBe, D., Klotz, S., 2004, "Bond of Reinforcement in Ultra High Strength Concrete", International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13-15, PP.375-387.

- [61] Hossain, K.M.A., Lachemi, M., 2008, "Bond Behavior of Self-Consolidating Concrete with Mineral and Chemical Admixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V.20, No.9, September.
- [62] Hossain, K.M.A., Ametrano, D., Lachemi, M., "Bond strength of GFRP bars in ultra-high strength concrete using RILEM beam tests", *Journal of Building Engineering*, 2017, 69–79.
- [63] Hwang, S.J., Lee, Y.Y., Lee, C.S., 1994, "Effect of Silica Fume on the Splice Strength of Deformed Bars of High-Performance Concrete", *ACI Structural Journal*, V.91, No.3, May-June, PP.294-302.
- [64] Hwang H.L., 1996 "Tensile Bond Strengths of Deformed Bars of High-Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, January-February, V.93, No.1, PP.11-20.
- [65] Ji, T., Mirzayee, A., Zangeneh-Madar, Z., Zangeneh-Madar, E., 2009, "Preliminary Study on Water Infiltration of Concrete Containing Nano-SiO₂ and Silicone", 8th International Congress on Civil Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran.
- [66] Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., Park, J.B., 2007, "Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles", *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.6, PP.1351-1355.
- [67] Jungwirth, J. and Muttoni, A., 2004, "Structural Behavior of Tension Members in UHPC", *Proceedings of the International symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, PP.533-544.
- [68] Karl-Heniz, R., Stefan, G., 2004, "Tests on ultra-high Performance fibre reinforced concrete designing hot-water tanks and UHPERC-shells", *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 361-374.
- [69] Kemp, E., Brezny, F. Unterspan, J., 1968, "Effect of Rust and Scale on the Bond Characteristics of Deformed Reinforcing Bars", *Journal of the American Concrete Institute*, ACI, Sep., PP.743-756.
- [70] Korpa, A., Trettin, R., 2004, "The Use of Synthetic Colloidal Silica Dispersions for Making High performance and Ultra High performance systems(HPC/UHPC)",

International symposium on Ultra High performance Concrete, September 13-15, Kassel, Germany, pp.155-164.

[71] Kmiecik, M., Kaminski, M., 2011, "Modelling Of reinforced Concrete Structures And Composite Structures With Concrete Strength Degradation Taken Into Consideration", Archive Of Civil And Mecanical Engineering.

[72] Leutbecher, T., Fehling, E., 2008, "Crack Formation and Tensile Behavior of UHPC Reinforced with a Combination of Rebars and Fibres", Proceedings of the second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Germany, 497-504.

[73] Li, G., 2004, "Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO₂", Cement and Concrete Research, Vol.34, No.6, PP.1043-1049.

[74] Li, H., Xiao, H.G., Yuan, J., Ou, J.P., 2004, "Microstructure of Cement Mortar with Nano-Particles", Composite Part B, Vol.35, No.B, PP.185-189.

[75] Li, S., Roy, D.M., Kumar, A., 1985, "Quantitative Determination of Pozzolanas in Hydrated System of Cement or Ca(OH)₂ with Fly Ash or Silica Fume", Cement and Concrete Research, Vol.15, No.6, PP.1079-1086.

[76] Ma, J., Schneider, H., 2002, "Properties of Ultra-High-Performance concrete", Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER), No.7, PP.25-32.

[77] Papadakis, V.G., 1999, "Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Silica Fume Activity in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.29, No.1, PP.79-86.

[78] Pul, S., 2010, "Loss of Concrete-Steel Bond Strength Under Monotonic And Cyclyc Loading of Light Weight and Ordinary Concretes", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering, 397-406.

[79] Pyoa S., Alkaysib M., El-Tawilb S., 2016, "Crack propagation speed in ultra high performance concrete (UHPC)", 109-118.

[80] Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C., 2007, "Influence of Nano-SiO₂ Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume", Construction and Building Materials, Vol.21, No.3, PP.539-454.

- [81] Richard, p., Cheyrezy, M., 1995, "Composition of Reactive powder Concretes", *Cement and Concrete Research*, V.25, No.7, pp.1501-1511.
- [82] RILEM, 1970, "Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials: RC6, Bond Test for Reinforcement Steed", 2.Pull-out Test.
- [83] Sadrmomtazi, A., Balalaei, F., Haghi, A.K., 2009, "Investigation of Mechanical and physical Properties of Mortars Containing Silica Fume and Nano SiO₂", 3rd International Conference on Concrete & Development, 27-29 April, Tehran, Iran, PP.1153-1161.
- [84] Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V. M.,Hotza, D., Repette, W.L., 2009, "Effect of Nano-Silica on Rheology and Fresh Properties of Cement Pastes and Mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.7, PP.2487-2491.
- [85] Taylor, H.F.W., 1990, "Cement chemistry", London, UK, Academic Press, PP.305-7,374-8.
- [86] Treece, R.A., Jirsa, J.O., 1989, "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcing Bars", *ACI Materials Journal*, V.86, No.2, PP.167-174.
- [87] Wards, A.D., Yannopoulos, P.J., 1978, "Local Bond Stress-Slip Relationship Under Repeated Loading", *Magazine of Concrete Research*, V.30, No.103, PP.62-72.
- [88] Wu, Z., Shi, C., He, W., Wang, D., "Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements", *Cement and Concrete Composites*, 2017, 148–157.
- [89] Voo, Y.L, and Foster, S.J,"Characteristics Of Ultra-High Performance 'Ductile' Concrete and its Impact on Sustainable Construction", the IES Journal Part A: Civil and structural Engineering vol 4, no .1 , pp.24-31 , 2010.
- [90] Xing, G., Zhou, C., Wu, T., Liu, B., 2015, "Experimental Study on Bond Behavior between Plain Reinforcing Bars and Concrete", *Materials and Science and Engineering*, 9 Pages.
- [91] Yazisi, H., 2007, "The Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete with High Volume Mineral Admixtures", *building and Environment*, V.42, No.5, pp.2083-2089.

[92] Zelic, J., Rusic, D., Veza, D., Krstulovic, R., 2000, "The Role of Silica Fume in the Kinetics and Mechanisms During the Early Stage of Cement Hydration", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.10, PP.1655-1662.

[93] Zhang, Y.L., Li, C.D., 2002, "Nano-Structured Technology and Nano-Structured Plastics", Beijing, China, China Ligh Industry Press, Vol.386, No.9, PP.8-15.

[94] Zuo, J., Darwin, D., 2000, "Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, V.97, No.65, PP.630-641.

Abstract:

This experimental study aimed to investigate the effects, behavior and local bonds between ultra high performance concrete and steel bars by the Nano Sillica presence. Considering the previous studies reveals that an experimental study in this field is necessary.

The experimental Pullout test is based on the RILEM standard. Pullout test is The oldest, easiest, cheapest and least time-consuming way to determine the local bond's stresses. The study managed to investigate the bond's stress between the ultra high performance concrete and steel bars by two categories: 1-different bar diameters (12 and 14) and 2-concrete's cover (db, 2db,3db and 4db) over 96 samples.

Experimental studies are the keys to complicated cases, where analytical methods are incapable of solving the problem due to the complexities associated with it. The Nano-sillica's behavior on the local bonds between ultra high performance concrete and steel bars is of such issues. Interaction among concrete, steel bars and Nano-sillica, steel bar's yielding, concrete's cracking, stresses redistribution and element's bearing incapability due to crushing or yielding, are some samples that reveals the problem complexities. However, the experimental studies, provides further information about the behavior of the Nano-Sillica's effects on local bonds between ultra high performance concrete and steel bars.

Keywords: 1-Nano-sillica 2-Pullout test 3-Ultra High performance Concrete 4-Local bond's tension



Shahrood University

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

**Investigation into the Effect of Nano silica on Local Bond
Between Ultra-high Performance Concrete and Steel Bars**

By : A.R. Mirfarhoodi

Supervisor:

Dr. A. Keyhani

June 2017