

تحلیل اجزاء محدود و تجربی رفتار پیوستگی بین آرماتور و بتن حاوی الیاف، میکروسیلیس و نانوسیلیس

حمید اسکندری نداف^{۱*} و مسعود نعمتی نژاد^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۲	
واژگان کلیدی: بتن، الیاف، میکروسیلیس، نانوسیلیس، رفتار پیوستگی، مدل سازی اجزاء محدود، تحلیل دینامیکی غیرخطی آزمایش Pull-out.	رفتار پیوستگی بین آرماتور و بتن به جهت کاربرد روزافزون بتن مسلح در سازه های مختلف از جمله مهم ترین موضوعات مورد بررسی در دنیا می باشد. در این پژوهش که به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی اجزاء محدود توسط نرم افزار ABAQUS انجام گرفته است، ۳۶ طرح اختلاط بتنی با سه نوع رده مقاومتی سیمان و با درصدهای مختلف الیاف پلیمری، میکروسیلیس و نانوسیلیس ساخته شده و تأثیر این مواد بر رفتار پیوستگی بین آرماتورهای فولادی و بتن و برخی خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری آن سنجیده شده است. روش استفاده از فنر غیرخطی نیز جهت مدل سازی این رفتار پیوستگی ارائه شده و مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی واقع شده است. نتایج حاکی از هماهنگی قابل قبول مدل با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین نشان می دهد در این روش به دلیل وجود فنر، نحوه مش بندی المان ها تأثیر ناچیزی بر نتایج پیوستگی - لغزش خواهد داشت. علاوه بر این، نتایج حاصل از آزمایشات و مقایسه آن با نتایج مدل سازی نشان می دهد که تأثیر الیاف در مقاومت پیوستگی ناچیز ولی در نحوه شکست بسیار موثر است. ترکیب توام میکرو و نانوسیلیس نیز می تواند باعث بهبود مقاومت پیوستگی در حدود ۲۰٪ گردد به طوری که استفاده از درصدی برابر از این دو ماده بهترین نتایج مقاومت پیوستگی را به دنبال داشته است.

۱- مقدمه

از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت و کارایی در بتن توانمند نوع سیمان، نسبت آب به مواد سیمانی، نوع و مقدار مواد پوزولانی، میزان و نوع روان کننده و سنگ دانه ها می باشد. برای تولید بتن توانمند با یک مقاومت فشاری خاص بایستی میزان اجزای ترکیبی و افزودنی های مربوط به آن و حتی میزان و زمان چرخش دستگاه مخلوط کن در هر مرحله نیز به دقت مورد بررسی و اندازه گیری قرار گیرد [۱]. تغییر در میزان هر یک از فاکتورها بر مشخصات و ویژگی های بتن تأثیرات زیادی گذاشته و شرایط بتن را

تغییر می دهد لذا برای تولید بتن توانمند با مشخصات مورد نظر در پروژه بایستی فاکتورهای متناسب با آن ویژگی به درستی تعیین و به میزان مشخصی در بتن استفاده گردد و با توجه به تنوع در مصالح مورداستفاده در بتن توانمند و تفاوت در ویژگی و قیمت آن ها می توان طرح بهینه ای از اختلاط را در جهت بهبود ویژگی های بتن یا کاهش هزینه های تولید ایجاد نمود [۲]. فوق روان کننده ها تأثیر فراوانی بر زمان گیرش بتن ندارند و زمانی که میکروسیلیس در مخلوط وجود داشته باشد، ارزشمند خواهند بود زیرا میکروسیلیس نیاز به آب مخلوط را افزایش می دهد. کاربرد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.eskandari@hsu.ac.ir

۱. دانشیار، دانشگاه حکیم سبزواری

۲. دانشگاه حکیم سبزواری

متفاوت است. هنگامی که طول گیرایی افزایش می‌یابد، میانگین تنش پیوستگی حاصل از آزمایش‌های تیری یا بیرون کشیدگی کاهش می‌یابد [۱۴ و ۱۵]. تأثیر مقاومت بتن بر مقاومت پیوستگی آرماتورهای محصور نشده و محصور شده توسط فولاد گذاری جانبی را می‌توان با $(f'_c)^{1/4}$ متناسب دانست [۱۶]. مقدار دانه‌های درشت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نیروی پیوستگی اضافه حاصل از فولاد گذاری جانبی داشته باشد [۱۷]. نمونه‌های تیری با پوشش تحتانی بیشتر، از خود، مقاومت پیوستگی بیشتری نشان می‌دهند [۱۸]. آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام شده توسط فرگوسن و همکاران نشان داد که شکافت، بیشتر در نمونه‌های بتنی با پوشش کمتر نسبت به نمونه‌های با پوشش بیشتر رخ می‌دهد [۱۹]. 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 [۲۰ و ۲۱]. بتن مقاومت بالا با دانه‌بندی کوچک نسبت به بتن معمولی که به میزان وسیعی در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی به کارگیری می‌شود، دارای انعطاف پذیری کمتری است. شکنندگی بتن با مقاومت بالا با دانه‌بندی ریز می‌تواند باعث کاهش نسبت $\frac{u_c}{(f'_c)^{0.5}}$ گردد [۲۲]. اندازه قطر آرماتور ممکن است بر مقدار تنش پیوستگی مؤثر باشد. مقاومت پیوستگی با افزایش قطر آرماتور افزایش می‌یابد [۲۳] و افت در مقاومت پیوستگی با قطر آرماتور رابطه خطی دارد [۲۴]. افزایش در سطح نسبی شیار آرماتور (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 فولاد گذاری جانبی، افزایش می‌دهد [۲۵]. مقاومت پیوستگی آرماتورهای محصور شده توسط فولاد گذاری جانبی، با افزایش سطح نسبی شیار و قطر آرماتور افزایش می‌یابد. همچنین توسعه خسارت در سطح تماس بتن-فولاد به مقاومت بتن و الگوی شکل آرماتور بستگی دارد [۲۶ و ۲۷]. هنگامی که زاویه شیار آرماتور بین ۴۰ تا ۱۰۵ درجه باشد، عملکرد پیوستگی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، اما هنگامی که زاویه شیار از ۳۰ درجه کمتر می‌شود، عملکرد پیوستگی متفاوت خواهد بود [۲۸-۳۰]. در آرماتور با زاویه شیار کمتر، مقاومت پیوستگی کمتری به وجود خواهد آمد [۲۵]. به

فوق روان کننده‌ها همراه با مواد افزودنی هوازا نیاز به دقت دارد، زیرا اغلب مقدار واقعی حباب هوا به وسیله فوق روان کننده‌ها کاهش می‌یابد [۳]. استفاده از مصالح مطابق استاندارد با مشخصات مکانیکی مشخص و تعیین شده در آزمایشگاه و دانه‌بندی صحیح مصالح سنگی و تعیین دقیق مدول نرمی آن بر طبق استانداردهای مربوطه تأثیر زیادی در رسیدن به ویژگی‌های دلخواه و مطلوب دارد [۴]. نیلی و همکاران بالاترین مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روزه به دست آمده را حاصل مخلوط شامل ۶٪ میکرو سیلیس و ۷٪ نانو سیلیس عنوان کرده‌اند. همچنین افزایش قابل توجهی در مقاومت الکتریکی نمونه مخلوط حاوی مجموع ۷/۵٪ میکرو و نانوسیلیس نسبت به بتن مرجع معمولی مشاهده شده است. همچنین میزان جذب مویینگی به پایین تری سطح، که شامل ۳٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس می‌باشد، کاهش پیدا کرده است [۵]. استفاده از نانو سیلیکا در بتن‌های با مقاومت بالا می‌تواند هم باعث افزایش مقاومت کوتاه مدت و هم افزایش مقاومت بلندمدت گردد [۶]. مقاومت در برابر نفوذ آب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با استفاده از نانو سیلیکا بهبود می‌یابد [۱۴]. در بتن، میکروسیلیس در دو سطح کار می‌کند. اولین اثر واکنش شیمیایی است که شامل واکنش پوزولانی سیلیکا با هیدروکسید کلسیم است که در نهایت به شکل ژل CHS در خواهد آمد و اثر دوم واکنش فیزیکی است زیرا میکروسیلیس ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از سیمان است [۷]. میکروسیلیس می‌تواند حفره باقی مانده در خمیر سیمان تازه و هیدراته را پر کرده و باعث افزایش تراکم آن گردد [۸]. پارامترهای متعددی در طرح اختلاط بتن از جمله نوع و دانه‌بندی سنگدانه، نوع سیمان و مواد افزودنی و همچنین ابعاد نمونه مورد آزمایش بر مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور تأثیرگذار هستند [۹ و ۱۰]. در این میان یان و همکاران [۱۱] به بررسی اثر اندازه و نوع سنگدانه بازیافتی بر مقاومت پیوستگی پرداخته‌اند. از سوی دیگر ژای و همکاران [۱۲] به بررسی سایز نمونه بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های پیوستگی پرداخته‌اند. که نتایج حاکی از قطر نمونه ۳۰۰ میلی متری در مقایسه طرح‌های مختلف نمونه است.

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 به شمار می‌رود [۱۳]. طول گیرایی در آزمایش‌های مختلف

و کمتر از مدل سازی رفتار پیوستگی بین انواع آرماتور و بتن بحثی در میان آمده است. منگ و ونگ مدل سازی رفتار پیوستگی را توسط ماتریس ضریب اصطکاک برای مواد الیافی بیان کردند [۳۶]. همچنین مطالعات اجزاء محدود جهت بررسی دال کامپوزیت پس کشیده بتنی و مدل سازی میلگرد در بتن ارائه شده است که در آن به بررسی دو عامل پس کشیدگی و طول پیوستگی در نتایج پرداخته شد [۳۷] و [۳۸]. لی در پژوهش خود اثر پیوستگی را با مدل المان Bond-Link برای بتن های معمولی و توسط مدل اجزاء محدود بیان نمود [۳۹]. واضح است که نقش بتن در میزان پیوستگی بین آرماتور و بتن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین دلیل بتن های دارای مواد افزودنی به علت پر کردن فضاهای خالی و چسبندگی بیشتر می توانند نقش مؤثری در این زمینه داشته باشند. الیاف پلیمری، ذرات نانو و میکروسیلیس نیز از جمله مهم ترین افزودنی های هستند که امروزه در صنعت بتن کاربرد فراوانی دارند. در این پژوهش به منظور بررسی اثر درصد های مختلف الیاف پلیمری و ذرات میکرو و نانوسیلیس، ۱۲ طرح اختلاط بتنی با ۳ رده مقاومتی سیمان مختلف ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع ساخته شده است. آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بر روی تمامی نمونه ها انجام گرفته و مدل سازی این نمونه ها توسط تحلیل اجزای محدود انجام گرفته و نتایج آن با یافته های تجربی صحت سنجی و مقایسه شده است.

۲- مدل سازی اجزاء محدود

تحلیل عددی به منظور بررسی رفتار پیوستگی آرماتور و بتن در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS انجام شده و نتایج تحلیل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. توزیع تنش ها و کرنش ها در راستای طول میلگرد قرار گرفته در بتن، نیروهای شکست حداکثر و نوع شکست اتفاق افتاده و از همه مهم تر نمودارهای تنش پیوستگی-لغزش نتایجی هستند که مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- هندسه مدل ها

برای مدل سازی نمونه های بتنی از المان سه بعدی و ۸ گرهی همگن C3D8 در مدل سازی آن ها استفاده شده است. برای آرماتورها، مشخصات میلگرد استاندارد AIII ساخت کارخانه نیشابور با مشخصات فنی ارائه شده توسط کارخانه و برای بتن مشخصات فنی شامل نمودارهای تنش

علاوه یی فی هائو و هونگ هائو [۳۱] به بررسی دو نوع الیاف فولادی دو سر قلاب و الیاف مارپیچ و تأثیر هندسه آن بر مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد به وسیله کار آزمایشگاهی پرداخته شده است. نتایج آن ها نشان داد که تأثیر طول مدفون، نرخ خروج و قطر سیم پیچ بر مقاومت پیوستگی تأثیرگذار است. همچنین تکنیک تقویت کننده ترکیبی از دو نوع الیاف به منظور بهبود بیشتر عملکرد پیشنهاد شده است.

در بیشتر موارد مقاومت پیوستگی موضعی آرماتورهای تحتانی در بتن معمولی (NC) و بتن خود متراکم (SCC) یکسان است. با این حال برای آرماتور فوقانی، مقاومت پیوستگی موضعی در SCC به طور متوسط ۲۰٪ نسبت به NC کمتر است. کاهش در مقاومت پیوستگی موضعی در آرماتورهای فوقانی عمدتاً ناشی از مقاومت کمتر بتن در آن محل است. بر اساس نتایج آزمایش های هسته، مقاومت فشاری هسته های بالای نمونه های تقریباً ۵٪ از هسته های پایین نمونه ها کمتر است. مقاومت پیوستگی موضعی کمتر آرماتورهای فوقانی از نحوه ریختن بتن تازه درون قالب ناشی می شود. ریختن بتن درون قالب سبب می شود تا حفره ای در بتن زیر آرماتور و یک ترک طولی در بتن بالای آرماتور ایجاد شود. با مقایسه مقاومت پیوستگی موضعی آرماتورهای فوقانی در NC و SCC می توان نتیجه گرفت که نحوه بتن ریزی SCC علت اصلی پایین تر بودن مقاومت پیوستگی آرماتورهای فوقانی در مقایسه با NC می باشد [۳۲]. افزایش نیروی بیرون کشیدگی بعد از ایجاد ترک، لغزش آرماتور درون بتن آغاز می شود. با افزایش لغزش مرتباً به دامنه ترک ها افزوده شده تا اینکه بر اساس محصورشدگی های متفاوت انواع مختلف شکست بیرون کشیدگی و شکافت اتفاق می افتد. یعنی اینکه محصورشدگی می تواند نوع شکست را برای نمونه ها تغییر دهد و یا حتی منجر به جاری شدن و تغییر شکل آرماتور شود [۳۳]. برای حالت های شکست بتن نیز تاکنون مدل های ارائه شده است. مدل ریاضی استنگ و همکاران [۳۴] با عنوان شکست Pull-out یکی از آنهاست. مدل ترک الاستیک پیشنهاد شده توسط تپفرز [۳۵] نیز یکی از پرکاربردترین مدل تنش پیوستگی برای خردشدگی بتن می باشد که شکست splitting نامیده می شود.

همانطور که در معرفی نتایج کار گذشتگان بیان شد، اکثر محققین بر روی نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی تکیه کرده

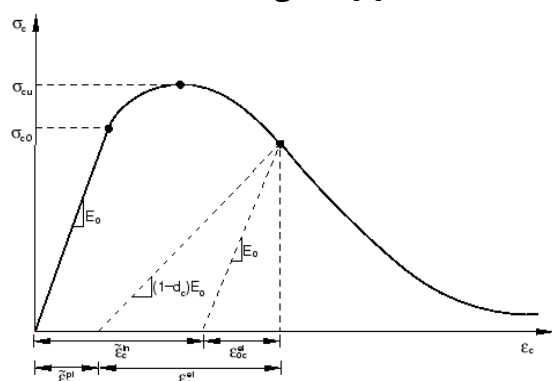
روابط ابتدا بایستی پارامترهای σ_c ، $\tilde{\epsilon}_c^{in}$ و d_c را که به ترتیب بیانگر حداکثر تنش فشاری، مقاومت کششی، کرنش غیرالاستیک و پارامتر خرابی بتن می‌باشد را مشخص کرد. کرنش غیرالاستیک از رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$\tilde{\epsilon}_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{oc}^{el} \quad (2)$$

در این رابطه $\epsilon_{oc}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}$ نشان دهنده کرنش الاستیک مصالح آسیب ندیده و ϵ_c کرنش کلی الاستیک می‌باشد. علاوه بر این برای اطمینان از صحت نمودار تنش-کرنش فشاری بتن، کرنش پلاستیک که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود، نبایستی مقدار منفی و یا نزولی داشته باشد.

$$\tilde{\epsilon}_c^{pl} = \tilde{\epsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3)$$

پارامتر خرابی فشاری (d_c)، برابر با نسبت کرنش غیرالاستیک ($\tilde{\epsilon}_c^{in}$) به کرنش فشاری کلی (ϵ_c) می‌باشد. این مقدار برای مصالح کاملاً سالم برابر صفر و برای مصالح کاملاً آسیب دیده برابر یک می‌باشد.

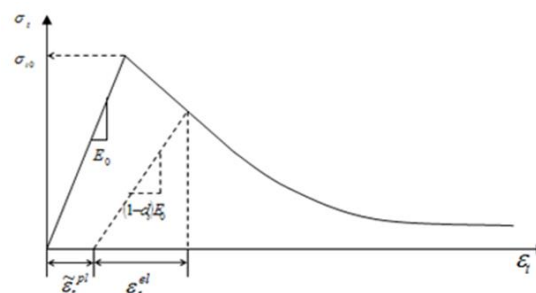


شکل ۲- نمودار تنش کرنش فشاری برای مدل خسارت پلاستیک بتن [۴۲]

۲-۲- تعریف اندرکنش مدل‌ها

برای تعریف اندرکنش فولاد و بتن از روش المان Bond-Link مطابق شکل (۳) استفاده شده است. همان‌طور که در شکل به صورت شماتیک نشان داده شده است، المان Bond-link شامل دو فنر موازی با محورهای عمود برهم ξ و η می‌باشد که به اندازه زاویه ψ نسبت به محور مختصات کلی، دوران دارد. المان پیوستگی از نظر مفهومی

کرنش کششی و فشاری به صورت دقیق طبق مدل نایال [۴۰] و آئین‌نامه بتن اروپا [۴۱] مدل شده و برای ترک‌خوردگی بتن و رسیدن به مرحله پلاستیک از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن^۱ (شکل ۱) استفاده شده است. سپس آرماتور با قطر ۱۶ موردنظر در نمونه‌های بتنی به صورت دقیق در داخل نمونه بتنی سوراخ شده جایگزین گردید و به صورت مماس با آن درآمد. همچنین مدل ساخته شده جهت مش بندی بهتر به صورت پارتیشن‌هایی به قطعات کوچک‌تر تبدیل شد.



شکل ۱- نمودار تنش کرنش کششی برای مدل خسارت پلاستیک بتن [۴۲ و ۴۳]

نرم افزار ABAQUS دقت نمودار تنش-کرنش کششی را با استفاده از مقدار کرنش پلاستیک، که از رابطه ۱ بدست می‌آید، بررسی می‌کند. مقدار منفی و یا نزولی کرنش پلاستیک نشان دهنده نادرست بودن نمودار تنش-کرنش می‌باشد و باعث ایجاد خطا در تحلیل می‌شود [۴۲].

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (1)$$

در این پژوهش از مدل نایال برای تعیین شکل نمودار تنش-کرنش استفاده شده است. در این مدل به خاطر جلوگیری از خطای زمان اجرا در نرم‌افزار ABAQUS کاهش مقاومت از تنش نهایی σ_t به $0.18 \sigma_t$ وجود دارد [۴۰ و ۴۴].

پارامتر خرابی کششی (d_t)، برابر با نسبت کرنش شکست ($\tilde{\epsilon}_t^{ck}$) به کرنش کلی (ϵ_t) می‌باشد. این مقدار برای مصالح کاملاً سالم برابر صفر و برای مصالح کاملاً آسیب دیده برابر یک می‌باشد.

نمودار تنش-کرنش فشاری بتن مانند شکل (۱) با استفاده از روابط پس از خرابی بتنی که در معرض فشار تک محوری قرار گرفته است، محاسبه می‌گردد. برای استفاده از این

¹ Concrete Damage Plasticity

سازی بین مقاومت بتن از روابط ۵ و ۶ برای بتن‌های مورد پژوهش استفاده شده است:

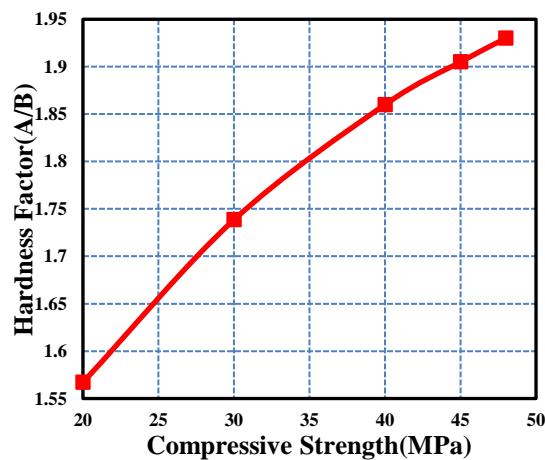
$$F_{FEM} = A \cdot (F_{EXP}) \quad (5)$$

$$u_{FEM} = B \cdot (u_{EXP}) \quad (6)$$

با استفاده از روابط بالا نتیجه می‌شود:

$$K_{FEM} = \frac{A}{B} \cdot (K_{EXP}) \quad (7)$$

محاسبه سختی در مدل اجزا محدود بر اساس رابطه نیرو جابجایی قابل محاسبه است. از این رو برای معادل‌سازی سختی تجربی برای محاسبات اجزا محدود، مقادیر تجربی نیرو و جابجایی هر کدام با اعمال ثابت‌هایی بر اساس نتایج آزمایشگاهی برای مدل اجزا محدود به کار گرفته می‌شوند. طبق روابط ارائه‌شده در بالا می‌توان دریافت که برای وارد کردن سختی مدل آزمایشگاهی در اندرکنش نرم‌افزار ABAQUS می‌بایست سختی به دست آمده را تبدیل و سپس به نرم‌افزار وارد کرد. به همین منظور رابطه بین مقاومت فشاری بتن و ضریب سختی اعمال شده به نرم‌افزار در شکل (۵) ارائه می‌شود.

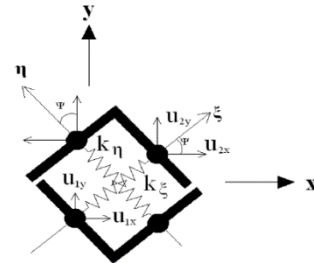


شکل ۵: رابطه مقاومت فشاری بتن با ضریب سختی Translator

در مرحله بعد به اعمال بارگذاری و شرایط مرزی طبق واقعیت و شرایط آزمایشگاهی پرداخته شد. بارگذاری‌های انجام شده در تمام نمونه‌ها به صورت بیرون کشیدگی کامل و در اثر اعمال جابجایی به سطح سر آرماتور به میزان ۲ میلی‌متر صورت گرفت. همچنین سطح بالای بتن به عنوان گیرداری کامل در نظر گرفته شد.

در ادامه نوع تحلیل را بر اساس تحلیل Dynamic/Explicit قرار داده و سپس خروجی‌های موردنظر که شامل تنش مماسی بین فولاد و بتن و همچنین

از دو فنر غیرخطی تشکیل شده و دو گره را با مختصات یکسان به هم وصل می‌کند که یکی موازی با محور میلگرد و دیگری عمود بر آن است. مؤلفه نیروی ارتباطی در جهت محور میلگرد، نیروی چسبندگی و مؤلفه عمود بر آن، نیروی شکافتگی شعاعی می‌باشد [۴۵].

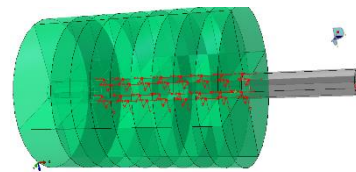


شکل ۳- مدل المان Bond-Link [۴۵]

این نوع المان‌ها به فنرهای غیرخطی نیز مشهورند. برای تعریف این نوع المان از اندرکنش خاصی از فنرهای غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS به نام Translator استفاده گردید. با استفاده از این نوع فنرهای غیرخطی می‌توان تمام خصوصیات پیوستگی بین آرماتور و بتن مانند تأثیر آج آرماتور، خوردگی، چسبندگی، سنگ‌دانه ریز و درشت و بسیاری از خواص آن را توسط این فنرها شبیه‌سازی کرد.

نحوه عملکرد این المان به گونه‌ای است که تنها در یک جهت به صورت فنر غیرخطی عمل کرده و در جهات دیگر سختی بی‌نهایت دارد [۳۹].

در این مدل‌سازی تعداد ۳۲ عدد Translator به صورت ۴ ردیف ۸ تایی بین بتن و آرماتور تعریف و در جهت مختصات کلی در جهت X سختی موردنظر همانند شکل (۴) به مدل داده شد.



شکل ۴- تعریف Translator در مدل

سختی داده شده به این فنرها بر اساس آزمایشات به دست آمده از همین پژوهش استفاده شده است که عبارت است از:

$$K = \left(\frac{F}{u} \right) \quad (4)$$

مقادیر F و u همان نتایج کار آزمایشگاهی هستند که با سعی و خطا به نتایج عددی نزدیک شده‌اند. برای رابطه

که در مجموع تعداد نمونه‌ها به ۳۶ عدد استوانه‌ای و ۳۶ عدد مکعبی رسید. طرح اختلاطها برای نمونه بتن‌های ساخته شده به صورت وزنی در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است همان‌طور که در جدول طرح اختلاط مشاهده می‌شود طرح اختلاطهای ۱ تا ۶ با الیاف و نسبت آب به سیمان ۰/۵ و طرح اختلاطهای ۷ تا ۱۲ با میکروسیلیس و نانو سیلیس و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته شد. در سری ۷ تا ۱۲ هدف بررسی اثر توأم میکروسیلیس و نانوسیلیس در بحث پیوستگی بتن توانمند بود.

همچنین جهت شناسایی نمونه‌های ساخته شده با ۳ نوع سیمان، آرماتور بتن‌های حاوی سیمان ۳۲۵ با رنگ سفید، آرماتور بتن‌های حاوی سیمان ۴۲۵ با رنگ قرمز و آرماتور بتن‌های حاوی سیمان ۵۲۵ با رنگ سبز علامت‌گذاری گردیدند.

مجموع میزان میکروسیلیس و نانو سیلیس ۱۰٪ وزن سیمان مصرفی می‌باشد و این مقدار در کلیه طرح اختلاط‌های مربوطه (۷ تا ۱۲) یکسان است و در این طرح اختلاط‌های مختلف تفاوت در استفاده از ترکیب مقادیر متفاوت میکروسیلیس و نانوسیلیس می‌باشد.

۳-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

سیمان‌های تپ ۲ مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه‌های سبزواری با مقاومت ۳۲۵، بجنورد با مقاومت ۴۲۵ و تربت حیدریه با مقاومت ۵۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد.

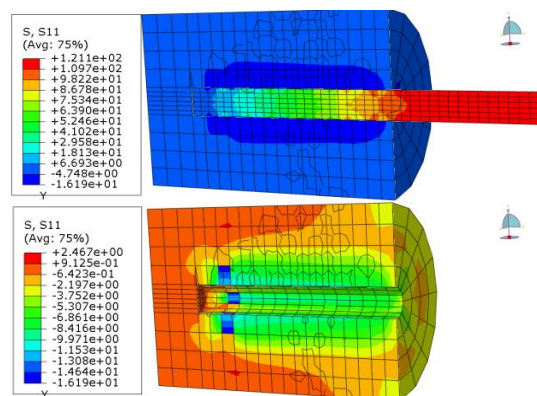
در ساخت این نمونه‌ها از مصالح سنگی سیلیسی ریزدانه و درشت‌دانه مطابق با منحنی دانه‌بندی که با آیین‌نامه ASTM [۴۷] مربوط به دانه‌بندی مصالح مصرفی در بتن مطابقت دارد، استفاده شد. لازم به ذکر است درصد ریزدانه مصرفی نسبت به مجموع ریزدانه و درشت‌دانه ۵۰٪ بود.

دوده سیلیسی استفاده شده به صورت پودر و به رنگ خاکستری است که در حین عمل اختلاط به آن اضافه می‌شود. افزودنی چندمنظوره، جهت افزایش دوام، مقاومت و تراکم بوده و همچنین بتن را ضد سولفات نموده و نفوذپذیری را به شدت کاهش می‌دهد.

نانو سیلیس مورد استفاده به صورت مایعی بی‌رنگ، سوپر پوزولان بر پایه نانو تکنولوژی با تأثیر فوق‌العاده و میزان مصرف اندک می‌باشد.

جابجایی سر آرماتور که توسط یک Set برای نرم‌افزار تعریف شده را وارد می‌کنیم [۴۶].

سپس مدل مش‌بندی و تحلیل دینامیکی روی نمونه‌های مذکور انجام گردید و نتایج تنش پیوستگی آنها به دست آمد. شکل (۶) نمونه‌ای از این نتایج را نمایش می‌دهد.



شکل ۶- نتایج تنش پیوستگی در نرم‌افزار ABAQUS

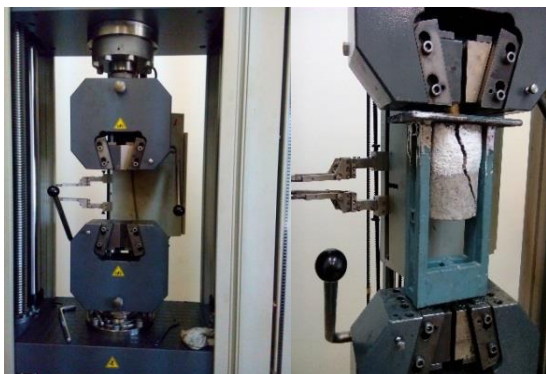
۳- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

کار آزمایشگاهی صورت گرفته در تحقیق حاضر با تمرکز بر بررسی درصدهای مختلف الیاف پلیمری و ذرات میکرو و نانوسیلیس در مخلوط بتن شامل سه رده مقاومتی سیمان مختلف ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. از این رو در نظر گرفتن پارامترهای دیگر مؤثر بر مقاومت پیوستگی سبب گستردگی بیشتر زمینه تحقیق شده که در نظر گرفتن تمامی این عوامل می‌تواند زمینه فعالیت برای تحقیقات آتی باشد. بر این اساس، دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی بر اساس استاندارد ASTM C33 [۴۷] برای ساخت بتن معمولی مورد استفاده قرار گرفته است که دلیل این امر شباهت کار پژوهشی انجام شده به کارهای با مقیاس معمول انجام شده در پروژه‌های عمرانی است. نمونه بر اساس استاندارد ASTM C900 [۴۸] در خصوص روش تست مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد از بتن سخت است، از سوی دیگر استفاده از نمونه استوانه‌ای به جهت توزیع دایره‌ای نیرو در تمامی جهات در سطح نمونه به صورت معمول در بیشتر تحقیقات در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش نمونه‌های آزمایشگاهی، به صورت استوانه‌ای ۱۰×۱۵ سانتیمتر و مکعبی ۱۰×۱۰ سانتیمتر برای انجام آزمایش‌های پیوستگی و تعیین مقاومت فشاری، در ۱۲ طرح اختلاط و با ۳ نوع سیمان تپ ۲ با مقاومت فشاری ۳۲۵، ۴۲۵ و ۵۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع ساخته شد

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

شماره طرح	آب (ml)	سیمان (gf)	میکرو سیلیس (gf)	نانوسیس (gf)	الیاف (gf)	فوق روان کننده (gf)	سنگدانه (gf)
۱	۶۶۵	۱۳۳۰	۰	۰	۰	۱۸	۳۶۰۰
۲	۶۶۵	۱۳۳۰	۰	۰	۶	۱۸	۳۶۰۰
۳	۶۶۵	۱۳۳۰	۰	۰	۱۲	۱۸	۳۶۰۰
۴	۶۶۵	۱۳۳۰	۰	۰	۱۸	۱۸	۳۶۰۰
۵	۶۶۵	۱۳۳۰	۰	۰	۲۴	۱۸	۳۶۰۰
۶	۶۶۵	۱۳۳۰	۰	۰	۳۰	۱۸	۳۶۰۰
۷	۵۳۲	۱۱۹۷	۱۳۳	۰	۰	۱۹	۳۶۰۰
۸	۵۳۲	۱۱۹۷	۹۵	۳۸	۰	۱۹	۳۶۰۰
۹	۵۳۲	۱۱۹۷	۳۸	۹۵	۰	۱۹	۳۶۰۰
۱۰	۵۳۲	۱۱۹۷	۶۶/۵	۶۶/۵	۰	۱۹	۳۶۰۰
۱۱	۵۳۲	۱۱۹۷	۱۱۴	۱۹	۰	۱۹	۳۶۰۰
۱۲	۵۳۲	۱۱۹۷	۰	۱۳۳	۰	۱۹	۳۶۰۰

تمام نمونه‌های ساخته شده مطابق شکل (۷) توسط دستگاه تست کشش Zwick با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش گردید و نتایج آن به صورت منحنی بار-جابجایی ترسیم شد. شکل (۸) نیز تمامی ۳۶ نمونه را بعد از انجام آزمایش و شکسته شدن نمایش می‌دهد.



شکل ۷- نمایش دستگاه و نحوه انجام تست بیرون کشیدگی

همچنین جهت نام‌گذاری نمونه‌ها به این صورت عمل شده است که شماره اول بعد از عبارت T بیانگر شماره طرح اختلاط مربوطه است و عبارت بعدی در نام‌گذاری مربوط به نوع نتایج است که به دو قسمت آزمایشگاهی (EXP) و اجزاء محدود (FEM) دسته‌بندی می‌شوند. به عنوان مثال عبارت T1-EXP در شکل (۹) به معنی نتایج آزمایشگاهی برای نمونه با طرح اختلاط شماره ۱ می‌باشد.

الیاف پلیمری (پلی‌پروپیلن) به عنوان مسلح کننده ثانویه بتن یا ملات جهت کاهش جمع شدگی و کنترل ترک خوردگی و افزایش دهنده دوام بتن در درازمدت کاربرد دارد. الیاف مطابق دستورالعمل شرکت سازنده در زمان ساخت و اختلاط بتن به همراه دیگر مصالح به مخلوط خشک یا تازه اختلاط یافته اضافه می‌گردد. میزان مصرفی بسته به عملکرد مورد انتظار به میزان ۰/۵ تا ۲ کیلوگرم در هر مترمکعب متغیر است. روش دیگر مخلوط نمودن الیاف در آب مصرفی قبل از اضافه کردن آن به مخلوط خشک می‌باشد. در این آزمایش‌ها الیاف به روش اول مخلوط شد.

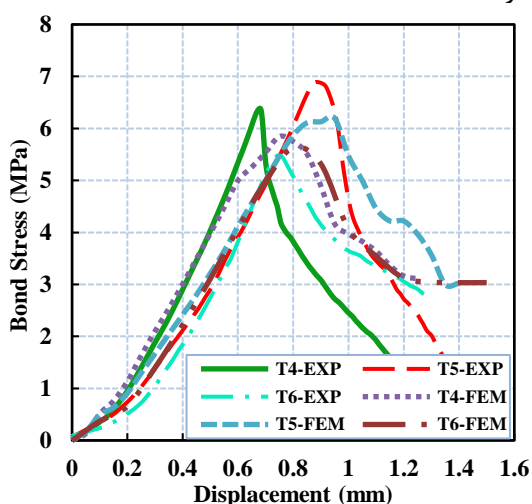
جدول ۲- مشخصات فنی فوق روان کننده مصرفی

شکل ظاهری	مایع قهوه‌ای‌رنگ
پایه شیمیایی	دیسپرسیون پلیمری کربوکسیلیت
وزن مخصوص	۱/۰۳ (Kg/Lit)
PH	حدود ۷

همچنین از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلیت (PCE) با مشخصات فنی جدول ۲ استفاده شد و هنگام مصرف ۰/۲ تا ۱/۲ درصد وزن سیمان مصرفی (بسته به اسلامپ مورد نظر به مصالح اضافه می‌شود).

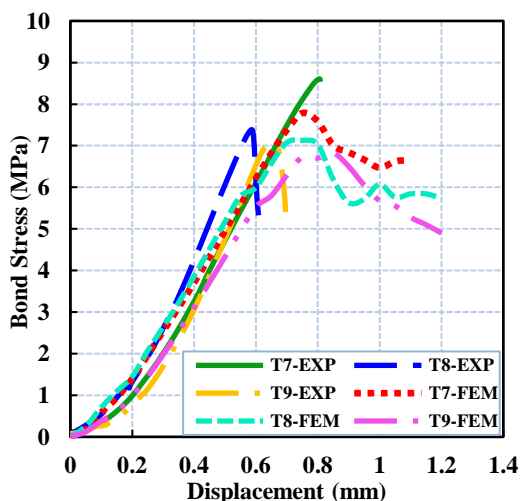
۳-۲- نحوه انجام آزمایش

با مشاهده نتایج افزایش پیوستگی با افزایش درصد الیاف، مانند کار گارسیا و همکاران [۵۰]، تا حد ۰/۵ مگاپاسکال را شاهد می‌باشیم. همچنین منحنی اجزاء محدود این ۳ نمونه تقریباً مشابه منحنی آزمایشگاهی بوده ولی مقاومت حداکثر را حدود ۰/۳ مگاپاسکال کمتر نمایش می‌دهد. از طرفی درصد جذب انرژی در منحنی اجزاء محدود بیشتر است.



شکل ۱۰- تنش پیوستگی نمونه‌های الیافی ۴ تا ۶ با سیمان ۳۲۵

در شکل (۱۱) که بتن سیلیس با سیمان ۳۲۵ را نمایش می‌دهد، نمودار ۷ که حاوی تنها ۱۱٪ میکروسیلیس می‌باشد.



شکل ۱۱- تنش پیوستگی نمونه‌های سیلیسی ۷ تا ۹ با سیمان ۳۲۵

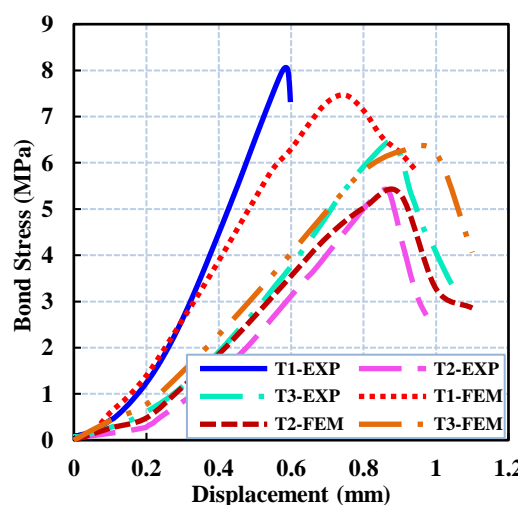
در مطالعات دیگر توسط چان و همکاران [۵۱] نتایج آن‌ها نشان داد که استحکام پیوستگی میلگرد و بتن به صورت قابل توجهی برای محتوای میکروسیلیس بالاتر از ۱۰ درصد است، به صورتی که مقاومت طرح مینا با صفر درصد



شکل ۸- نمونه‌های آزمایش شده

۴- ارزیابی نتایج

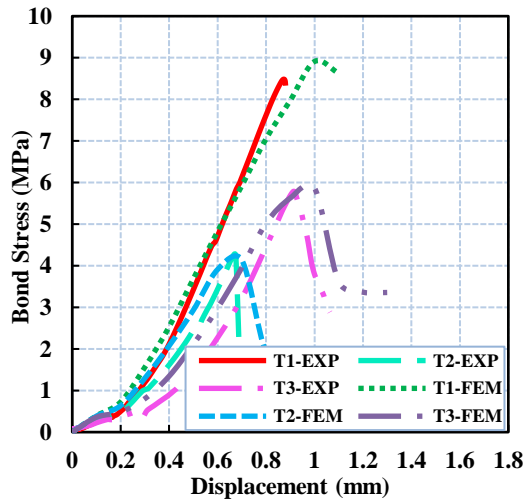
در این قسمت به بحث و مقایسه بر روی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی اجزاء محدود با کار آزمایشگاهی انجام شده می‌پردازیم. در شکل (۹) نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود نمونه‌های الیافی ۱ تا ۳ با ۳۲۵ کیلوگرم سیمان در مترمکعب با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر اساس نمودار متوجه خواهیم شد که منحنی ۱ که بدون الیاف است، با مقاومت پیوستگی ۸ مگاپاسکال بیشترین اثر را با سیمان ۳۲۵ دارد. سطح زیر منحنی مقاومت پیوستگی- جابجایی تا نقطه ماکزیمم منحنی نشان دهنده جذب انرژی است [۴۹] که با توجه به نتایج سطح زیر منحنی تا نقطه ماکزیمم برای طرح‌های T2 و T3 مقدار کمی بیشتر از طرح مینا (T1) می‌باشد. از این رو از مقایسه این کار با گارسیا و همکاران [۵۰] نیز تأثیرناچیز الیاف در مقاومت پیوستگی را نیز شاهد می‌باشیم.



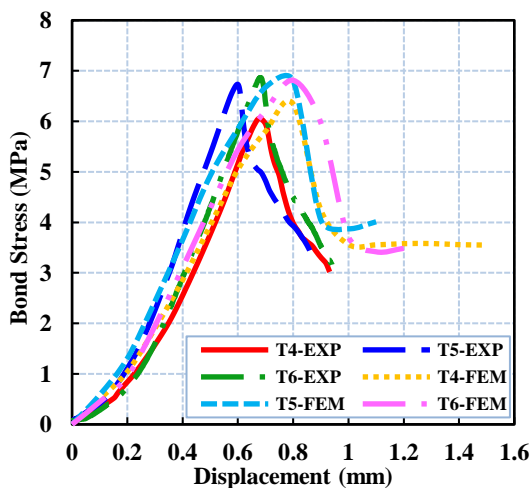
شکل ۹- تنش پیوستگی نمونه‌های الیافی ۱ تا ۳ با سیمان ۳۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب

در شکل ۱۰ الیاف از ۱/۳ تا ۲/۳٪ رو به افزایش بوده که

نانوسیلیس با سیمان ۴۲۵ در شکل ۱۵ با کاهش تدریجی درصد میکروسیلیس و افزایش درصد نانوسیلیس شیب نمونه‌های ۷ تا ۹ کمتر می‌شود. این به این معنی است که درصد جذب انرژی رو به کاهش است.



شکل ۱۳- تنش پیوستگی نمونه‌های الیافی ۱ تا ۳ با سیمان ۴۲۵



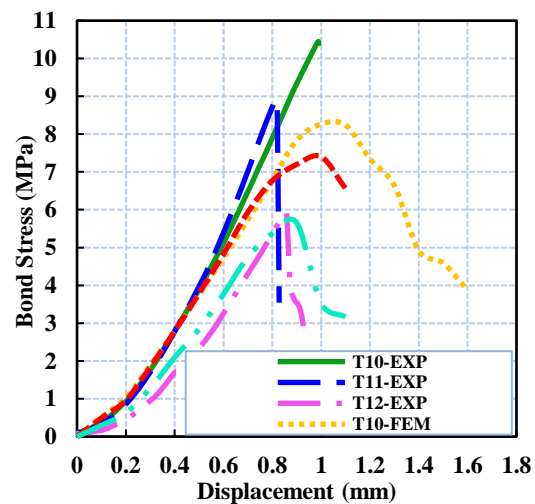
شکل ۱۴- تنش پیوستگی نمونه‌های الیافی ۴ تا ۶ با سیمان ۴۲۵

با مقایسه منحنی اجزاء محدود و آزمایشگاهی نمونه‌های ۱۰ تا ۱۲ با سیمان ۴۲۵ در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود که مدل‌سازی ارائه شده در این نمودار نیز، همانند کار چان و همکاران [۵۱]، حداکثر تطابق را با نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. همچنین تمامی منحنی دارای شیب و در نتیجه درصد جذب انرژی یکسانی می‌باشند.

از بررسی نتایج بتن‌های الیافی با سیمان ۵۲۵ در شکل (۱۷) نتیجه می‌شود که بر خلاف بتن‌های با سیمان ۳۲۵ و ۴۲۵، نمونه شماره ۱ دارای کمترین تنش پیوستگی می‌باشد. همچنین با افزایش درصد الیاف، مشابه با کار گارسیا

میکروسیلیس برابر ۴/۸۲ مگاپاسکال و برای طرح شامل ۲۰ درصد میکروسیلیس برابر ۵/۳۷ مگاپاسکال به دست آمده است که سبب میانگین افزایش ۱۲ درصدی در مقاومت پیوستگی نسبت به طرح مبنا شده است.

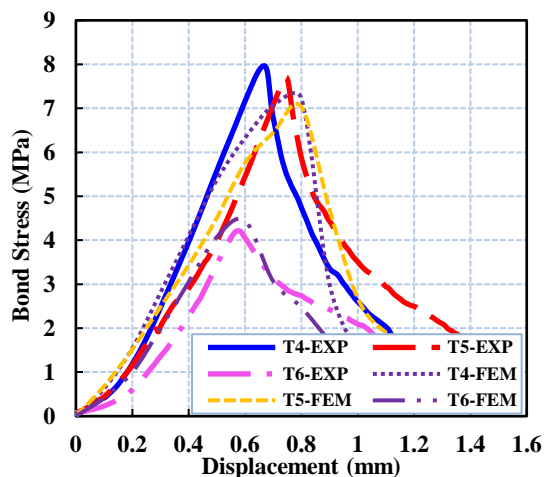
در شکل (۱۲) نزدیک‌ترین منحنی اجزاء محدود به آزمایشگاهی نمونه شماره ۱۲ می‌باشد ولی دو نمونه دیگر دارای اختلافی به میزان ۰/۸ مگاپاسکال دارند. از این امر می‌توان نتیجه گرفت که روش مدل‌سازی تطبیق بهتری در نمونه‌های ساخته شده با سیمان ۳۲۵ و نانوسیلیس دارد. همچنین بیشترین تنش پیوستگی از آزمایش نمونه دارای درصد یکسان میکرو و نانوسیلیس، همانند کار چان و همکاران [۵۱]، در حدود ۲۰٪ به دست آمده است.



شکل ۱۲- تنش پیوستگی نمونه‌های سیلیسی ۱۰ تا ۱۲ با سیمان ۳۲۵

با توجه به شکل (۱۳) که بتن الیافی با سیمان ۴۲۵ را نمایش می‌دهد، متوجه خواهیم شد تمام منحنی‌های اجزاء محدود کاملاً با منحنی آزمایشگاهی تطبیق دارد. از این رو این روش مدل‌سازی در بتن الیافی با سیمان ۴۲۵ نتیجه قابل قبولی خواهد داد. همچنین با مقایسه با کار گارسیا و همکاران [۵۰] افزایش مقاومت پیوستگی با افزایش درصد الیاف همراه است. در شکل (۱۴) تمام نتایج منحنی‌های اجزاء محدود و آزمایشگاهی در بتن‌های الیافی ۴ تا ۶ در سیمان ۴۲۵ به طور مشابه با نمونه‌های با سیمان ۳۲۵ تقریباً دارای شیب یکسان و مقاومت حداکثر با اختلاف محدود، مانند کار گارسیا و همکاران [۵۰]، هستند که این امر هم نشان دهنده تأثیر کم الیاف در مقاومت پیوستگی و هم انطباق کامل با این نوع نمونه‌ها دارد.

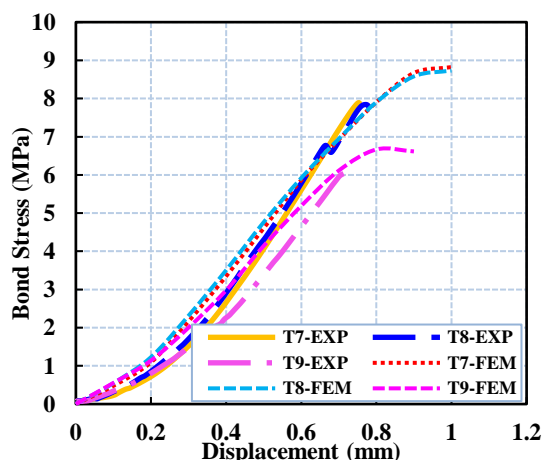
با مشاهده شیب نمونه‌های ۷ تا ۹ حاوی میکرو و



شکل ۱۸- تنش پیوستگی نمونه‌های الیافی ۴ تا ۶ با سیمان ۵۲۵

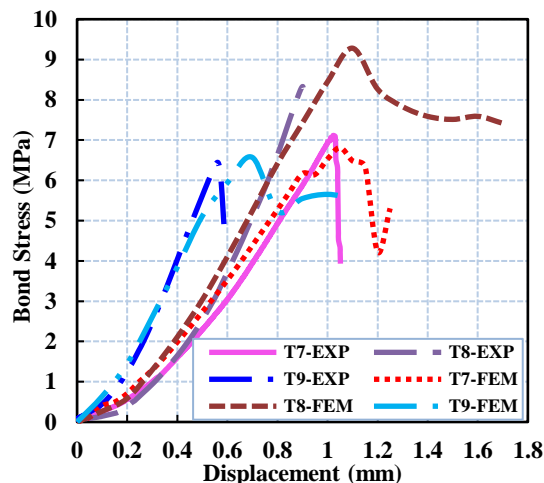
نمونه‌های ۴ و ۵ بتن با سیمان ۵۲۵ که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، مقاومت یکسانی در پیوستگی داشته، اما مشابه با سیمان ۳۲۵ در نمونه شماره ۶، بر خلاف کار گارسیا و همکاران [۵۰]، افتی قابل توجه را شاهد می‌باشیم که این امر نشان دهنده تأثیر کم این درصد از الیاف در سیمان ۵۲۵ می‌باشد. در این ۳ نمونه نیز نتایج اجزاء محدود با آزمایشگاهی انطباق قابل قبولی دارد.

در شکل (۱۹) نمونه‌های ۷ تا ۹ سیلیسی ساخته شده با سیمان ۵۲۵ نمایش داده شده است. با مشاهده این نمودار متوجه خواهیم شد که شیب تمام منحنی‌های تنش-جایابی تقریباً یکسان بوده و با کاهش درصد میکروسیلیس، همانند کار چان و همکاران [۵۱]، حداکثر تنش پیوستگی نیز در حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین انطباق منحنی اجزاء محدود با آزمایشگاهی نشان دهنده درستی ضریب سختی وارد شده به نرم‌افزار را دارد.

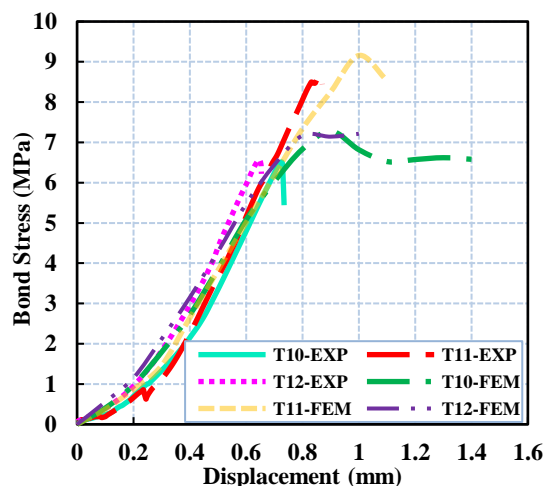


شکل ۱۹- تنش پیوستگی نمونه‌های سیلیسی ۷ تا ۹ با سیمان ۵۲۵

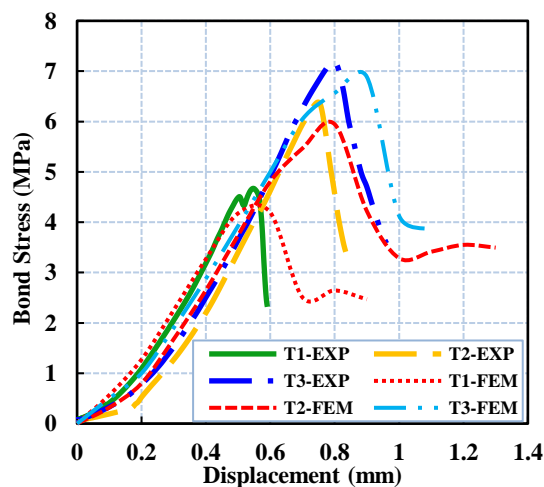
و همکاران [۵۰] میزان مقاومت پیوستگی نیز به طور محسوسی افزایش یافته است.



شکل ۱۵- تنش پیوستگی نمونه‌های سیلیسی ۷ تا ۹ با سیمان ۴۲۵

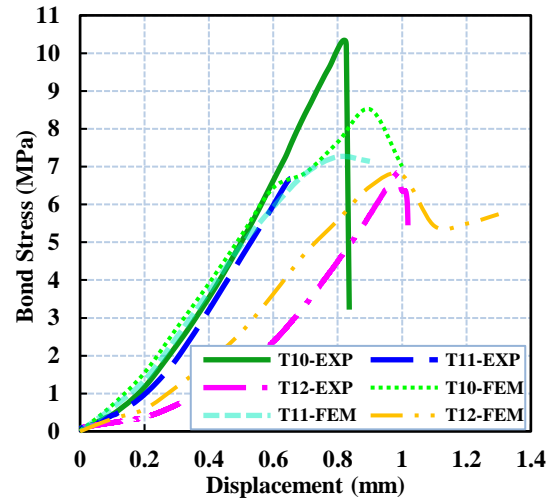


شکل ۱۶- تنش پیوستگی نمونه‌های سیلیسی ۱۰ تا ۱۲ با سیمان ۴۲۵



شکل ۱۷- تنش پیوستگی نمونه‌های الیافی ۱ تا ۳ با سیمان ۵۲۵

- با مقایسه نتایج مدل سازی ارائه شده توسط اعمال سختی به فنر غیرخطی المان Bind-link در نتایج آزمایشگاهی این پژوهش، نشان از انطباق قابل قبولی برای این روش پیشنهادی دارد.
- رابطه مقاومت فشاری بتن با ضریب سختی اعمال شده برای بتن حاوی مواد افزودنی پوزولانی بین ضرایب ۱/۵۶ تا ۱/۹۴ متغیر می باشد.
- نتایج مدل سازی اجزاء محدود نشان می دهد که محاسبه خصوصیات مصالح برای هر نمونه به صورت مجزا، در نتایج بسیار مؤثر می باشد.
- در صورت استفاده از روش فنر غیر خطی، مش-بندی المان ها تأثیر ناچیزی بر نتایج پیوستگی- لغزش خواهد داشت.
- با مقایسه نتایج با کار گذشتگان نتیجه می شود که افزودنی میکروسیلیس و نانوسیلیس تا حدود ۲۰٪ باعث افزایش مقاومت پیوستگی می گردد.
- نانوسیلیس و میکروسیلیس، در مقایسه با یکدیگر، نشان می دهد که مواد افزودنی نانو و میکروسیلیس در بهبود رفتار پیوستگی بین آرماتور و بتن مؤثرتر بوده اند به طوری که استفاده از درصدی برابر از این دو ماده بهترین نتایج مقاومت پیوستگی را به دنبال داشته است.



شکل ۲۰- تنش پیوستگی نمونه های سیلیسی ۱۰ تا ۱۲ با سیمان ۵۲۵

منحنی شماره ۱۰ در شکل (۲۰) دارای بیشترین تنش پیوستگی نسبت به دو نمونه دیگر، همانند کار چان و همکاران [۵۱] می باشد، مخصوصاً نمونه ۱۲ که فقط دارای ۱۱٪ نانوسیلیس است. همچنین نتایج اجزاء محدود برای این نمونه ها به جز طرح اختلاط شماره ۱۰ دارای انطباق حداکثری با نتایج آزمایشگاهی می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی و مقایسه ی آزمایشگاهی و مدل سازی اجزاء محدود ۳۶ نمونه بتنی حاوی الیاف، میکرو و نانوسیلیس ساخته شده با ۳ رده مقاومتی سیمان پرداخته شد و نتایج زیر به دست آمد:

مراجع

- [1] C.H. Goodspeed, S. Vanikar, and R.A. Cook, "High-performance concrete defined for highway structures", Concrete International, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 62-67.
- [2] J.J. Park, S.T. Kang, K.T. Koh, and S.W. Kim, "Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion", in Proceedings of the international symposium on ultra-high performance concrete, structural materials and engineering series, 2008, pp. 105-112.
- [3] A.M. Neville, Properties of concrete, 1995.
- [4] K.J. Folliard and N.S. Berke, "Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture", Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 9, 1997, pp. 1357-1364.
- [5] M. Nili, A. Ehsani, and K. Shabani, "Influence of nano-SiO₂ and micro-silica on concrete performance", in Proceedings Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010, pp. 1-5.
- [6] G. Li, "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂", Cement and Concrete research, Vol. 34, No. 6, 2004, pp. 1043-1049.

- [7] A. Dunster, "Silica fume in concrete, Information Paper NIP 5/09", ed: IHS BRE Press, Garston, UK, 2009.
- [8] S. Sakka, Handbook of sol-gel science and technology. 1. Sol-gel processing vol. 1: Springer Science & Business Media, 2005.
- [9] K.M.A. Hossain and M. Lachemi, "Bond behavior of self-consolidating concrete with mineral and chemical admixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 20, 2008, pp. 608–616.
- [10] A. Castel and S.J. Foster, "Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement", Cement and Concrete Research, Vol. 72, 2015, pp. 48–53.
- [11] S.-W. Kim, H.-D. Yun, W.-S. Park, and Y.-I. Jang, "Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete", Materials & Design, Vol. 83, 2015, pp. 257–269.
- [12] H. Zhai, P. Hagan, and D. Li, "Sample Size and Sample Strength Effects on Testing the Performance of Cable Bolts", Proceedings of the 16th Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 10-12 February 2016, pp. 40-52.
- [13] D.A. Abrams, Tests of bond between concrete and steel, 1913.
- [14] T. Mylrea, "Bond and anchorage", in ACI Journal Proceedings, 1948.
- [15] D. Watstein, "Distribution of bond stress in concrete pull-out specimens", in ACI Journal Proceedings, 1947.
- [16] D. Darwin, M. L. Tholen, E. K. Idun, and J. Zuo, "Splice strength of high relative rib area reinforcing bars", ACI Structural Journal, Vol. 93, 1996.
- [17] M.R. Esfahani and M.R. Kianoush, "Development/splice length of reinforcing bars", ACI structural journal, Vol. 102, 2005.
- [18] P.M. Ferguson, R.D. Turpin, and J. N. Thompson, "Minimum bar spacing as a function of bond and shear strength", in ACI Journal Proceedings, 1954.
- [19] P.M. Ferguson, J.E. Breen, and J.N. Thompson, "Pullout tests on high strength reinforcing bars", in ACI Journal Proceedings, 1965.
- [20] H.H. Abrishami and D. Mitchell, "Analysis of bond stress distributions in pullout specimens", Journal of Structural Engineering, Vol. 122, 1996, pp. 255–261.
- [21] J. Chinn, P.M. Ferguson, and J.N. Thompson, "Lapped splices in reinforced concrete beams", in ACI Journal Proceedings, 1955.
- [22] S.P. Shah, S.E. Swartz, and C. Ouyang, Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials: John Wiley & Sons, 1995.
- [23] S. Viwathanatepa, E. Popov, and V. Bertero, "Effects of generalized loadings on bond of reinforcing bars embedded in well confined concrete", in Report no. EERC 79/22, ed: Earthquake Engineering Center Berkeley, 1979.
- [24] P. Soroushian and K.-B. Choi, "Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete", ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 2, 1989, pp. 217–222.
- [25] D. Darwin and E.K. Graham, "Effect of deformation height and spacing on bond strength of reinforcing bars," ACI Structural Journal, Vol. 90, No. 6, 1993, pp. 646–657.
- [26] J. Zuo and D. Darwin, "Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-

strength concrete", ACI structural Journal, Vol. 97, 2000.

[27] X. Song, Y. Wu, X. Gu, and C. Chen, "Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete", Construction and Building Materials, Vol. 94, 2015, pp. 209–217.

[28] L.A. Lutz and P. Gergely, "Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete", in ACI Journal Proceedings, Vol. 64, No. 11, 1967, pp. 711–721.

[29] G. Rehm, "The fundamentals of bond between steel reinforcement and concrete", Deutsche association for steel reinforcement-concrete, 1961.

[30] S. Soretz and H. Holzenbein, "Influence of rib dimensions of reinforcing bars on bond and bendability", in ACI Journal Proceedings, 1979.

[31] Y. Hao and H. Hao, "Pull-out behaviour of spiral-shaped steel fibres from normal-strength concrete matrix", Construction and Building Materials, Vol. 139, 2017, pp. 34–44.

[32] M.R. Esfahani, M. Lachemi, and M.R. Kianoush, "Top-bar effect of steel bars in self-consolidating concrete (SCC)", Cement and Concrete Composites, Vol. 30, No. 1, 2008, pp. 52–60.

[33] T.P. Tassios, "Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions", Bulletin d'information du CEB, Vol. 131, 1979, pp. 65–122.

[34] H. Stang, Z. Li, and S. Shah, "Pullout problem: stress versus fracture mechanical approach", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, No. 10, 1990, pp. 2136–2150.

[35] R. Tepfers, "Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars", Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 106, 1979, pp. 3–12.

[36] Q. Meng and Z. Wang, "Theoretical model of fiber debonding and pull-out in unidirectional hybrid-fiber-reinforced brittle-matrix composites", Journal of Composite Materials, Vol. 49, pp. 1739–1751, 2015.

[37] M.M. Rana, B. Uy, and O. Mirza, "Experimental and numerical study of the bond–slip relationship for post-tensioned composite slabs", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 114, 2015, pp. 362–379.

[38] F. Yan and Z. Lin, "Bond behavior of GFRP bar-concrete interface: damage evolution assessment and FE simulation implementations," Composite Structures, Vol. 155, 2016, pp. 63–76.

[39] X. Li, "Finite element modeling of skewed reinforced concrete bridges and the bond-slip relationship between concrete and reinforcement", 2007.

[40] R. Nayal and H.A. Rasheed, "Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, 2006, pp. 831–841.

[41] C.E.-I. Beton, CEB-FIP model code 1990: design code, Vol. 214, No. 213, 1993.

[42] L. Kachanov, "Time of the rupture process under creep conditions, Izu", Izvestiia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Teckhnicheskikh Nauk, Vol. 8, 1958, pp. 26–31.

[43] M. Salari, S. Saeb, K. Willam, S. Panchet, and R. Carrasco, "A coupled elastoplastic damage model for geomaterials", Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 193, No. 27–29, 2004, pp. 2625–2643.

[44] R.I. Gilbert and R.F. Warner, "Tension stiffening in reinforced concrete slabs", Journal of the structural division, Vol. 104, No. 12, 1978, pp. 1885–1900.

- [45] D. Ngo and A. Scordelis, "Finite element analysis of reinforced concrete beams", in ACI Journal Proceedings, 1967.
- [46] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, ABAQUS/standard user's Manual vol. 1: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2001.
- [47] A. Committee, C09. ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates, ed: ASTM International, 2003.
- [48] C. ASTM, 900. 2004. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- [49] B. Larson, NDT Education Resource Center, ed, 2010.
- [50] E. Garcia-Taengua, J. Marti-Vargas, and P. Serna, "Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete", Construction and Building Materials, Vol. 105, 2016, pp. 275–284.
- [51] Y.-W. Chan and S.-H. Chu, "Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 7, 2004, pp. 1167–1172.