



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۰۱ تا ۱۱۶
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 101- 116



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

پیوستگی میلگردهای فولادی و پلیمری در بتن های خودتراکم

موسی مظلوم^{*۱}، کمیل مومنی^۲

۱- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی لویزان تهران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

(دریافت ۱۳۹۱/۲/۱۴، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۲۶)

چکیده

در این تحقیق با انجام آزمایش های متعدد بر روی نمونه های بتنی ساخته شده از بتنهای خودتراکم و معمولی، که حاوی میلگرد فولادی و پلیمری بوده اند، به بررسی عوامل موثر بر مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد پرداخته شد. عمده ترین آزمایش در این تحقیق، آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن بوده است. بتنهای خودتراکم ساخته شده دارای دو نوع طرح اختلاط بوده اند که در یکی از آنها ماده فوق روان کننده کمتری نسبت به دیگری استفاده شد تا بتوان تاثیر میزان فوق روان کننده را نیز بر روی مقاومت پیوستگی بدست آورد. با مقایسه نتایج آزمایش بیرون کشیدن میلگرد (pull out) بر روی نمونه های بتن معمولی و خود تراکم، اثر نوع بتن بر روی مقاومت پیوستگی بررسی شد و این نتیجه حاصل آمد که میلگردهای فولادی دارای مقاومت پیوستگی بهتری نسبت به میلگردهای ساخته شده از رشته های پلیمر مسلح (FRP) در انواع بتن بوده اند؛ همچنین بتنهای خودتراکم با درصد فوق روان کننده بیشتر، نسبت به سایر بتنهای موجود در آزمایشها دارای مقاومت پیوستگی بیشتری بوده اند. در ضمن مدل های موجود دارای دقت کافی برای پیش بینی مقاومت پیوستگی میلگردهای پلیمری (FRP) نبوده اند. بنابراین از مدل سازی با نرم افزار آباکوس برای این کار استفاده شده است و دو نوع مدلسازی دو بعدی و سه بعدی مقایسه شده اند. این بخش از تحقیق نشان داد که برای پیش بینی نتایج تجربی، مدلسازی سه بعدی مناسب تر است.

کلمات کلیدی

مقاومت پیوستگی، بتن خود تراکم، میلگرد پلیمری، آزمایش بیرون کشیدن میلگرد.

* نویسنده مسئول و عهد دار مکاتبات Email: Mazloom@srttu.edu

۱- مقدمه

رفتار چسبندگی بین میلگرد و بتن بطور وسیعی مطالعه شده و تحقیقات بسیار زیاد تجربی، تحلیلی و عددی در این زمینه موجود است [۱]. مکانیزم اصلی در گسترش چسبندگی بر هم کنش فولاد- بتن، بر هم کنش مکانیکی بین سطح دنداندار یا تغییر شکل یافته میله تقویت کننده و بتن است. بهرحال، مکانیزمهای دیگر به مانند اصطکاک سطح و چسبندگی شیمیایی نیز نقش دارند. در بررسی حاضر با مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج تجربی سایر محققین به بررسی روابط تئوری موجود برای بدست آوردن تنش پیوستگی بین میلگردهای فولادی و پلیمری با سه نوع بتن پرداخته شده است. هدف اصلی این بررسی، مطالعه ویژگی های اتصال میلگردهای پلیمری و فلزی در بتن خود تراکم و معمولی است. پیوستگی بتن و آرماتورهای مسلح کننده، نقش کلیدی را در رفتار اعضای سازه های بتن مسلح در هنگام فرارگیری تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی ایفا می کند. مقاومت پیوستگی (Bond Resistance) آرماتورهای مسلح کننده قرار گرفته در بتن به چسبندگی شیمیایی، پایداری اصطکاک و پیوستگی برشی بستگی دارد. هنگامی که چسبندگی شیمیایی از بین می رود، مکانیزم پیوستگی وابسته به نوع آرماتورها میشود [۱].

در آرماتورهای ساده، بسته به میزان مقاومت اصطکاک آرماتورها، لغزش به سمت خارج اتفاق می افتد و در نتیجه شکست از نوع لغزش Sliding است. در آرماتورهای آجدار، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاک، چفت و بست مکانیکی بین بتن و آج های آرماتور سبب بالا رفتن مقاومت پیوستگی می گردد. در میان مکانیزم های پیوستگی، پیوستگی برشی آرماتور آجدار با بتن از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج های آرماتور و کلیدهای بتنی بین آنها انجام می شود.

در نتیجه در محل تماس آج آرماتور و بتن، تنش فشاری ایجاد می شود. انتظار می رود رفتار چسبندگی میله های پلیمری (FRP) با بتن متفاوت از میله های فولادی سنتی باشد. از این رو پارامترهای کلیدی که بر عملکرد اتصال اثر گذارند، متفاوت است. یکی از این پارامترها مدول الاستیسیته میله های پلیمری است که در مقایسه با فولاد، در هر دو جهت طولی و عرضی پایینتر است؛ پارامتر دیگر مقاومت برشی میله های پلیمری است که بسیار کمتر از فولاد است [۱]. شکل ۱ توصیفی از برهم کنش بین میله میله پلیمری تغییر شکل یافته با بتن را

نشان می دهد.

در این شکل در ابتدای بارگذاری، بخش OA، مکانیزم اصلی مقاومت در برابر بار خارجی، چسبندگی شیمیایی بین دو ماده است.

در این مرحله، هیچ لغزش قابل اندازه گیری وجود ندارد. برای مقادیر تنش اتصال بیشتر، چسبندگی شیمیایی شکسته می شود و مکانیزم اتصال متفاوتی شکل می گیرد (بخش AB). زمانیکه جابجایی در انتهای بارگذاری شده میله افزایش می یابد و شکلهای سطحی میله تنشهای زیادی را در بتن ایجاد می کند، آنگاه ترکهای ریز ایجاد شده در نوک شکلهای سطحی میله اجازه جابجایی میله را می دهد. این اعتقاد وجود دارد که زمان شروع ترکهای ریز به دلیل تغییر شکلهای سطح نرم میله های پلیمری نسبت به میله های فولادی تأخیر دارد. با افزایش جابجایی میله، بخش BC، تنشهای حاصل شده افزایش قابل توجهی می یابد و اجزای شعاعی نیروهای اتصال در برابر حلقه های تنش کششی گسترش یافته، در بتن متعادل می شوند (شکل ۲).

اگر میله بطور مناسبی محصور نشده باشد و مقدار حلقه های تنش از مقاومت کششی بتن بیشتر شود، ممکن است ترکهای جدایش در طول میله تقویت کننده مشاهده شود. اگر مقاومت پیوستگی کافی ایجاد شود، بخش CD، تنش اتصال می تواند به مقاومت ماکزیمم اتصال برسد. با حرکت هر دو انتهای میله (انتهای بارگذاری شده و بارگذاری نشده)، مقاومت اتصال کاهش می یابد [۱].

در این تحقیق جهت گسترش نتایج آزمایشگاهی اقدام به مدلسازی اجزاء محدود آزمایش بیرون کشیدن میلگرد گردید. آزمایش بیرون کشیدن میله از داخل بتن به دو صورت دو بعدی و سه بعدی توسط نرم افزار اجزاء محدود Abaqus مدلسازی شد. در مدل های دو بعدی، از المان فنر جهت اتصال میلگرد و بتن استفاده شد؛ در مدل های سه بعدی، از المان چسب برای این منظور کمک گرفته شد. در هر دو بخش مدلسازی دو بعدی و سه بعدی جهت معترسبازی مدلها، نتایج اولیه تحلیل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند و با انجام سعی و خطا بر روی مدلها، اقدام به کالیبره کردن آنها شد. یکی از مهمترین قسمت های کالیبره کردن در مدلسازی دو بعدی، اختصاص فنهایی با سختی مناسب بین قطعه بتنی و میلگرد است. پس از به ثبات رسیدن مدلها، اقدام به تحلیل انواع مدل های شبیه سازی شده گردید. از مدل های دو بعدی متقارن و غیرخطی برای شبیه سازی پیوستگی بتن و میله پلیمری میتوان استفاده کرد [۲] در این مدلها از المانهای چهار گره ای استفاده شده است. فشار

شود [۵]. در حالتی مابین دو مدل، دو قانون غیرکوپل برای ارائه تنشهای ماکزیمم و مماسی استفاده می شود. در این مدل حالت تنش مماسی به گونه ای تعریف شده است که کمتر از ضرب تنش ماکزیمم در ضریب اصطکاک است. در این مدل ناحیه ای از المان تعریف می شود که می تواند به دو بخش غیر صدمه یافته و بخش کاملاً صدمه یافته تقسیم شود [۶].

۲- هدف

هدف از انجام این تحقیق بررسی پیوستگی میان میلگردهای پلیمری و بتن خود تراکم و بسط نتایج در مواردی که امکان آزمایش وجود ندارد، بوده است.

۳- روش انجام کارهای آزمایشگاهی

برای معتبر ساختن مقایسه ها، تمام بتن های خودتراکم استفاده شده در آزمایشها دارای نسبت آب به سیمان برابر بوده اند. همچنین از میلگردهای فولادی و پلیمری استفاده شده است که اندازه و نوع استفاده هر یک از آنها در طرحهای بتن، در جدول ۱ ذکر شده است. مصالح مصرفی و طرح اختلاط های استفاده شده در این تحقیق به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ آمده اند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری جهت سه نوع بتن SCC1، NC و SCC2، مطابق جدول ۴ است. کمیته ACI 440 [۷] روشهای آزمایش برای میلگردهای پلیمری (FRP) تقویت کننده سازه های بتنی را ارائه نموده است. از جمله آزمایشهای مندرج در این راهنما، آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن است.

هدف از انجام این آزمایش اندازه گیری مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن، و بکارگیری نتایج در سایر موارد آزمایشگاهی است. متغیر اساسی قطر و نوع میلگرد پلیمری است. با بررسی استاندارد ASTM 944-99 [۸] مشاهده شد که راهنمای آزمایش بیرون کشیدن میلگرد (pull out) جهت میلگردهای فلزی نیز تشابه زیادی به راهنمای آزمایش کمیته ACI 440 دارد. بنابراین در آزمایشهای میلگردهای فولادی نیز روش آماده سازی نمونه ها و مراحل انجام آزمایش، مانند میلگردهای پلیمری، بر طبق ACI 440 انجام گرفت. وضعیت تجربی آزمایش بیرون کشیدن میله از داخل بتن مطابق شکل ۳ است. ابعاد قالبهای چوبی ساخت بتن $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ است و به دلیل عبور میلگرد از سمت دیگر آن دارای سوراخی در قسمت تحتانی است. هرکدام از نمونه های آماده شده بطور مجزا داخل دستگاه Universal قرار داده شد و انتهای آزاد میلگرد داخل فکهای دستگاه ثابت گردید (شکل ۴). پس از آنکه قسمت آزاد

تماسی، با قید شعاعی اولیه ایجاد شده، و اصطکاک کولمب با المانهای دو بعدی مدل شده است. چسبندگی شیمیایی با المانهای فنر غیرخطی بین همه گره های مجاور بتن و میلگرد پلیمری در طول تماس مدل شده است. در نوع دیگر از مدلسازی مدل مکعب بتنی و میله پلیمری با استفاده از المانهای دو بعدی مدل شده اند. بتن و میله های پلیمری بترتیب با المانهای صفحه ای چهار گره ای و المان مربعی دو گره ای مدل شده اند [۱].

برهم کنش اتصال بین دو ماده با المانهای فنر مدل شده است که داده های ورودی ارتباط بین بارگذاری و کشش فنر است. داده های تجربی آزمایش بیرون کشیدن در طول تماس کم برای کالیبره کردن ویژگیهای فنر استفاده شده است. مدلهای عددی براساس هندسه یک بعدی میله و بررسی خواص سطح برهم کنش، می توان ارائه داد [۳]. سیستم شامل المانهای پیوسته بتن، المانهای تیر و المانهای اتصال است و قانون اتصال-جابجایی دلخواه می تواند اعمال شود. محققان تاکید کرده اند که نتایج هر مدل اجزاء محدود (FEM) که فرض اتصال کامل را دارد بشدت به اندازه مش بستگی دارد و بنابراین مدلهای اتصال ارائه شده ابزاری مؤثر است زیرا اثر اندازه مش را کاهش می دهد [۴]. پس از انجام تحلیل مقدار کرنش محوری بوجود آمده در تمامی میلگردها تقریباً یکسان بدست آمد. در حالیکه با توجه به نتایج آزمایشگاهی، با تغییر قطر میلگرد، نتایج کرنش محوری عوض می شدند. یکی از نقاط ضعف این روش در عدم در نظر گرفتن اثر قطر بر روی کرنشها ارزیابی گردید. بنابراین ضرورت مدلسازی سه بعدی ایجاد گردید. در مدلهای سه بعدی بجای المان فنر از المان چسب استفاده شد.

در مدل دوبعدی هدف اصلی کالیبراسیون، پیدا کردن مشخصات فنر(سختی) و در مدل سه بعدی، هدف اصلی پیدا کردن مشخصات المان چسب بوده است. در گذشته نیز چندین مدل دارای نواحی چسبی ارائه شده است و در سالهای اخیر بررسی گشته است که دلیل آن انعطاف پذیریشان برای شبیه سازی فرآیند تدریجی است که جدایش ترک اولیه با تنشهای چسبندگی محدود می شود. با توسعه در مکانیک شکست و تئوری پلاستیسیته، این مدلها محدوده وسیعی از کاربردهای ممکن را شامل خواهند شد. جنبه مهم برای کاربردهای مهندسی، مدلهای با ناحیه چسب با ترکیب فرآیند جدایش با اصطکاک حاصل می باشد. در این مفهوم، میتوان اصطکاک را تا زمان شکست کامل اتصال صرف نظر کرده و ترم اصطکاک را تنها پس از اینکه ناحیه چسب از بین رفت اعمال کرد [۴]. در مدلهای مشابه، ترم اصطکاک از لحظات اولیه در نظر گرفته می

سنج بر روی میلگردها توسط دستگاه Datalogger ثبت گردید که شامل مقادیر کرنش - نیرو بوده است که کرنشها به دلیل کوچک بودن مقدارشان بر اساس میکرواسترین ($\mu\epsilon$) می باشند. بدیهی است با تغییرات نیرو بر اساس زمان مقادیر کرنشهای یک میلگرد نیز در حال تغییر است. بیشینه خروجی Strain gauge برای هر میلگرد که در واقع همان بیشینه کرنش محوری هر میلگرد در فرآیند آزمایش بیرون کشیدن میلگرد می باشد نیز در جدول ۵ مشخص گردیده است. نمودار خروجی اصلاح شده دستگاه Universal با توجه به بیشینه نیروی کششی هر نمونه و بیشینه جابجایی انتهای بارگذاری شده میلگردها، جهت کلیه نمونه ها مطابق شکل ۷ است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، میلگردهای فولادی حدود $1/18$ برابر نمونه های مشابه پلیمری دارای مقاومت پیوستگی بهتری در انواع بتن بوده اند؛ همچنین بتنهای خودتراکم با درصد فوق روان کننده بیشتر، نسبت به سایر بتنهای موجود در آزمایشها دارای مقاومت پیوستگی بیشتری بوده اند.

۵- پیوستگی میلگرد و بتن

تنش پیوستگی U به صورت نسبت تغییرات نیروی محوری در واحد طول به محیط مؤثر میلگردهای انتقال دهنده نیرو تعریف می گردد [۱۳] (شکل ۸). یعنی:

$$U_{\max} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$A = 2 \pi r l d \quad (2)$$

همچنین به جهت اثر دادن مقاومت بتن نمونه ها بر روی پیوستگی، بیشینه تنش پیوستگی ماکزیمم U'_{\max} طبق رابطه (۳) تعریف می گردد [۱۴].

$$U'_{\max} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{f_c}} \quad (3)$$

که در این روابط F_{\max} بیشینه نیروی کششی در آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بر حسب کیلو نیوتن (kN) و r شعاع میلگرد بر حسب (mm)، l_d طول گیرداری بر حسب (mm) بر مبنای استاندارد ACI 440 و A سطح جانبی میلگرد بر حسب (mm²) می باشد. بر این اساس تنش پیوستگی بوجود آمده در نمونه ها با توجه به بیشینه نیروی کششی در جدول ۶ مشخص گردیده شده است. در این جدول، Loaded end slip، لغزش انتهای بار گذاری شده میلگرد بر حسب میلیمتر (mm) است. در آئین نامه آبا [۱۵] و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۱۶] مقاومت پیوستگی بین میلگرد فولادی و بتن معمولی طبق رابطه (۴) و در آئین نامه ACI 318 [۱۷]، طبق رابطه (۵) ارائه شده است.

میلگرد ثابت می شود، قسمت متحرک دستگاه Universal به سمت بالا حرکت می کند و آزمایش شروع می شود. بارگذاری تا مرحله ای ادامه می یابد که بتن ترک نخورد و پیوستگی بین میلگرد و بتن بطور کامل از بین نرفته باشد. حداکثر بار (نیروی کششی میلگرد از داخل بتن) و جابجایی متناسب با آن توسط دستگاه Universal ثبت و کنترل می گردد. سیستم رایانه متصل به این دستگاه قادر است خروجی ها را بصورت نمودار نیرو- جابجایی ترسیم نماید. در زمینه مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی پیوستگی میلگردهای فولادی و پلیمری با انواع بتن، دانشمندان کشور آمریکا [۹]، نروژ [۱۰] و آلمان [۱۱] نیز تحقیقات ارزشمندی را انجام داده اند.

۴- نتایج آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن

نحوه نامگذاری نمونه ها بر اساس پارامترهای زیر است:

۱ = نوع میلگرد ۲ = قطر میلگرد ۳ = شماره نمونه ۴ = نوع بتن بطور مثال نمونه ST/14 - 1 / SCC1، اولین نمونه میلگرد فلزی شماره ۱۴ می باشد که داخل بتن با طرح اختلاط SCC1 قرار گرفته است. نمودار خروجی دستگاه UNIVERSAL برای چهار نمونه ST/16 - 1 / SCC1 و ST/16 - 3 / SCC2 و ST/16 - 4 / NC در شکل ۵ نشان داده شده است. با بررسی این شکل مشاهده می شود که بیشترین نیرو برای بیرون کشیدن میلگرد ۱۶ از داخل بتن، مربوط به نمونه ساخته شده از بتن SCC1 (بتن خودتراکم با درصد فوق روان کننده ۱،۶ درصد) بوده است. با مقایسه نتایج سایر بتن ها مشخص گردید که کمترین نیروی بیرون کشیدگی مربوط به بتن معمولی (NC) بوده است. در زمینه بتنهای خودتراکم، هاشیموتو اوکامورا [۱۲] نیز تحقیقات گسترده ای انجام داده است.

همچنین نمودار نیرو- لغزش جهت چهار نمونه

$$FR/16 - 1 / SCC1, FR / 16 - 2 / SCC1$$

$$FR / 16 - 3 / SCC2, FR/16 - 4 / NC$$

در شکل ۶ نشان داده شده است. با بررسی این شکل نیز مشاهده می شود که بیشترین نیروی بیرون کشیدگی میلگرد پلیمری نمره ۱۶ از داخل بتن، مربوط به نمونه ساخته شده از بتن SCC1 و کمترین نیروی بیرون کشیدگی مربوط به نمونه ساخته شده از بتن NC بوده است. در جدول ۵ نیروی کششی در آزمایش بیرون کشیدن میلگرد (Pullout) برای کلیه نمونه ها نشان داده شده است. در فاصله ۴۰ سانتیمتری از فک دستگاه Universal بر روی هر میلگرد یک کرنش سنج جهت مشخص کردن میزان کرنش محوری کار گذاشته شد. خروجی هر کرنش

حدود ۴۰ درصد انطباق وجود دارد. این مطلب را می توان ناشی از خصوصیات بتن خودتراکم دانست. چرا که در رابطه (۹)، فرض بر استفاده از میلگردهای پلیمری در بتنهای معمولی بوده است. در مجموع به دلیل عدم پوشش مناسب فرمولهای فوق الذکر در بررسی مدلهای مختلف آزمایشگاهی، در این تحقیق تصمیم گرفته شد که از مدل سازی با نرم افزار آباکوس برای این کار استفاده شود.

نمودار تنش لغزش جهت نمونه های ST/16 - 4/ NC ، ST/16/SCC1, ST/16-3/SCC2, در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل با ثابت نگه داشتن نوع و قطر میلگرد (ST16) و تغییر دادن نوع بتن (SCC1, SCC2, NC) در تنش پیوستگی نیز، تغییراتی ایجاد می گردد. از مقایسه این نمونه ها نیز مشخص می گردد که پایین ترین تنش پیوستگی مربوط به نمونه های ساخته شده از بتن معمولی بوده است. نمودار تنش - لغزش جهت نمونه های ST/14,16,18,20/ SCC1 در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل اثرات ثابت ماندن نوع بتن و میلگرد و تغییرات قطر بر روی تنشهای پیوستگی مطابق نتایج آزمایشگاهی مشاهده می گردد. مطابق این شکل با افزایش قطر میلگرد در یک طول لغزش ثابت، تنش پیوستگی کاهش می یابد. در کالیبره کردن مدل های ساخته شده با نرم افزار آباکوس به کلیه نتایج فوق توجه شده است.

۶- مدهای شکست

براساس نسبت بین مقاومت بتن و مقاومت برشی برآمدگی های سطحی، چهار مد متفاوت از شکست اتصال اتفاق می افتد: الف) برش قسمتی یا همه برآمدگی سطح میله: مقاومت اتصال میله های پلیمری با مقاومت برشی بین لایه های پشت سر هم فیبر یا با مقاومت برشی برآمدگی میله کنترل می شود. بنابراین، افزایش در مقاومت بتن با افزایش مقاومت- اتصال میله پلیمری ارتباطی نخواهد داشت.

ب) شکست برشی بتن: بتن در برابر برآمدگی سطح میله متلاشی می شود؛ بنابراین مقاومت اتصال اساساً با مقاومت برشی بتن کنترل می شود.

پ) مد ترکیبی: با سطح متوسطی از مقاومت بتن، احتمالاً مدی مرکب از دو شکست بالا اتفاق می افتد.

ت) فشرده شدن: در نتیجه استحکام کم در جهت شعاعی، میله ممکن است که در امتداد بتن فشرده شود. در این مورد اتصال با اصطکاک بین برجستگی های میله و بتن ایجاد می شود.

$$U = 0.67 \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$U = 0.7 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

طبق پیشنهاد نویسندگان یکی از کمیته های آئین نامه آستو [۱۸]، مقاومت پیوستگی بین میلگرد فولادی و بتن خودتراکم بصورت رابطه (۶) ارائه شده است.

$$U = 0.97 \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

علاوه بر مراجع فوق، سایر محققین نیز تحقیقاتی را بر روی پیوستگی میلگردهای فولادی و بتن های خود تراکم انجام داده اند. با انجام آزمایشهای کشش مستقیم و غیر مستقیم [۱۹] رابطه (۷) و رابطه (۸) را در این خصوص ارائه شده است [۲۰].

$$\frac{U}{\sqrt{f'_c}} = 0.1 + 0.25 \frac{c}{d_b} + 4.15 \frac{d_b}{l_d} + \frac{A_{tr} F_{yt}}{41.6 s n_s d_b} \quad (7)$$

$$U = [-0.879 + 0.324 \cdot \left(\frac{c}{\phi_s}\right) + 5.79 \cdot \left(\frac{\phi_s}{l_d}\right)] \cdot \sqrt{f'_c} \quad (8)$$

در خصوص میلگردهای فولادی روابط ۷ و ۸، در حدود ۷۲ درصد به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بوده اند اما در مورد میلگردهای پلیمری، اختلافات زیادی مشاهده گردید. در تحقیقات سایرین [۲۱]، به بررسی تنش پیوستگی بین میلگردهای پلیمری و بتن معمولی پرداخته شده است. به پیشنهاد این افراد، تنش پیوستگی بین میلگرد پلیمری و بتن معمولی با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می شود.

$$U = \frac{14.7 \cdot \sqrt{f'_c}}{d_b} \quad (9)$$

در این زمینه دانشمندان دیگری نیز به ارائه روابطی جهت بدست آوردن تنش پیوستگی بین میلگردهای فولادی با انواع بتن های خودتراکم [۲۲] و پرمقاومت پرداخته اند [۲۳] در شکل ۹، با توجه به مقاومت فشاری بتنهای مصرفی، تنش پیوستگی بدست آمده در آزمایشگاه (رابطه ۳) با تنش های پیوستگی حاصل از آئین نامه آبا، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آئین نامه بتن آمریکا مقایسه گردیده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، نزدیکترین مقدار به نتایج آزمایشگاهی، تنش پیوستگی حاصل از آئین نامه بتن آمریکا است. در شکل ۱۰، نتایج تنش پیوستگی آزمایشگاهی (رابطه ۱)، با تنشهای پیوستگی بدست آمده از روابط مراجع فوق و بر اساس تغییرات قطر میلگرد، مقایسه گردید. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، نزدیکترین مقدار به نتایج آزمایشگاهی، تنش پیوستگی حاصل از رابطه (۸) می باشد. در شکل ۱۱، نتایج تنش پیوستگی آزمایشگاهی در خصوص میلگردهای پلیمری، با نتایج بدست آمده حاصل از رابطه (۹)، مقایسه گردید. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری، تنها

بصورت دو بعدی انجام شد. در این مدل میلگرد پلیمری بصورت یک بعدی با مدول یانگ $E=45\text{GPa}$ با استفاده از المانهای دو گره ای مدل می شود. در بررسی حاضر از المان Truss انتخاب شده است. بتن نیز بصورت دو بعدی و با المانهای مربعی چهار گره ای و ضخامت 150mm ، مدول یانگ $E=30\text{GPa}$ ، در نرم افزار مدل شده است. در ضمن با توجه به تقارن مدل نسبت به محور Y فقط نیمی از بتن مدل شده است. در این مدل نوع تحلیل Static, Riks در نظر گرفته شده است که برای شبیه سازی فرآیند استاتیک الاستیک غیرخطی نتایج دقیقی را می دهد. در این نوع تحلیل، زمان مفهومی ندارد و شبیه سازی تا زمان رسیدن به یک مقدار خاص متوقف می شود. در اینجا از جابجایی 5mm انتهای بارگذاری شده در جهت Y برای توقف تحلیل استفاده شده است. در مادول Interaction، فنرها تعیین می شوند. در اینجا فقط گره هایی از میله و بتن که می بایست با یک فنر به هم متصل شوند مشخص می گردد. مقدار سختی فنر (منحنی بار-جابجایی) در مدلسازی غیر خطی است و می بایست بصورت لیستی از جابجایی ها و نیروهای مرتبط در فایل ورودی آباکوس وارد شود. مدل شامل 5 فنر است (شکل 14). سطح بالایی بتن در جهت عمودی و گوشه بالا سمت راست در جهت افقی مقید می شود و جابجایی 5mm به نقطه بالایی میله اعمال می شود. با توجه به ساختار مدلسازی دو بعدی، این نتایج برای تمامی میلگردهای پلیمری یکسان بدست آمدند. در حالیکه با توجه به جدول 5، با تغییر قطر میلگرد پلیمری، نتایج کرنش محوری عوض می شوند. بنابراین مدلسازی دو بعدی برای گسترش نتایج تجربی در حالت کلی قابل استفاده نیست و تنها زمانیکه اثر تغییرات طول میلگرد در بررسی پیوستگی میلگرد و بتن مدنظر باشد، میتوان از مدلسازی دو بعدی استفاده کرد.

۷-۲- مدلسازی سه بعدی

برای شبیه سازی سه بعدی نمی توان از المانهای فنر استفاده کرد زیرا تنها به یک گره تمام نیرو وارد می شود. در نتیجه در آن نقطه تنش زیاد و در گره های مجاور تنش کم می شود و عدم پیوستگی در نتایج بوجود می آید. برای حل این مشکل میتوان از المانهای چسب استفاده کرد. [24] قسمت چسب بصورت یک چهارم استوانه به ضخامت 0.2mm در نظر گرفته شده است که با 378 گره و 160 المان COH3D8 مش بندی شده است (شکل 15). به دلیل هندسه متقارن مدل و کم کردن زمان تحلیل، تنها یک چهارم از میلگرد و بتن مدل شده است. هر سه قسمت میلگرد، بتن و چسب موجود در مدل ها به صورت D3، Deformable و Extrude شده مدل شده اند. مرحله

زمانی که حداکثر تنش اتصال حاصل می شود، مکانیزم تحمل بار از بین رفته و مقاومت اتصال باقیمانده اساساً به مقاومت اصطکاکی وابسته می شود [1]. پس از انجام آزمایش ها و بررسی نحوه شکست نمونه ها مشخص گردید که میلگردهای پلیمری در این آزمایشها بصورت شکافت بتن و با ایجاد ترکهای عمودی از بتن خارج گردیده ولی میلگردهای فولادی با ایجاد ترک پیشرونده در قطعه بتنی بصورت مایل و بصورت لغزشی از بتن خارج می گردند. هیچکدام از میلگردهای فولادی به مرز تنش جاری شدن نرسیده و همچنین در مورد میلگردهای پلیمری نیز هیچکدامشان به مرز متلاشی شدن الیاف خود میلگرد (جاری شدن) نرسیدند. در مدل های ساخته شده با نرم افزار آباکوس به کلیه نتایج مربوط به مدهای شکست توجه شده است.

۷-۳- مدلسازی اجزاء محدود آزمایش بیرون کشیدن میلگرد (PULLOUT)

۷-۱- مدلسازی دو بعدی

روند مدلسازی شامل دو هدف اصلی است. هدف اول کمک به فهم چگونگی گسترش تنش اتصال در تماس بین میلگرد و بتن در حین بیرون کشیدن میله است. این کار از نتایج تجربی قابل استنباط نیست زیرا که هیچ کرنش سنجی را نمی توان در طول تماس میله بدلیل اثرگذاری بر رفتار تماسی، قرار داد. از این رو، برای بررسی رفتار اتصال میله قرار گرفته در بتن در حین آزمایش، از نتایج تحلیلی استفاده می شود. هدف دوم توسعه روندی برای پیش بینی رفتار اتصال دارای طول بیشتر با استفاده از اطلاعات تجربی نمونه های آزمایشگاهی دارای طول کوچکتر است. این هدف، کاربردی عملی دارد زیرا که به دنبال کاهش نیاز به آزمایش های متعدد برای بررسی تأثیرگذاری طول تکیه گاه بر مقاومت میانگین اتصال است. این حقیقت پذیرفته شده است که طول اتصال در مقاومت میانگین اتصال میله تأثیر دارد [1]. نقش اصلی المانهای فنر در این مدل شبیه سازی بر هم کنش اتصال بین میله و بتن اطراف در حین بیرون کشیدن است. داده های ورودی مورد نیاز که رفتار فنرها را مشخص می سازند شامل مقادیر انبساط و نیروهای مرتبط اعمالی به فنر است. در مدل حاضر، انبساط فنر با جابجایی میله و نیروی مرتبط، بصورت تابعی از مقاومت اتصال میله تعریف می شود. برای تعیین منحنی بار-جابجایی اتصال، داده های تجربی از آزمایش های بیرون کشیدن استفاده شده است. برای نمونه، در خصوص مدلسازی آزمایش بیرون کشیدن میلگرد پلیمری نمره 10، مدلسازی

سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی جهت برخی از نمونه های آزمایشگاهی در کنار یکدیگر قابل مشاهده است. با مقایسه این نمودارها، مشاهده میگردد که نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی ها در حدود ۷۵ درصد با هم تطابق دارند. بنابراین با توجه به دقت قابل قبول شبیه سازی و انطباق تقریبی نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی در مورد میلگردهای فولادی (ST) و پلیمری (FRP) از این نوع مدل سازی میتوان در نمونه هایی که اثر تغییرات قطر و طول میلگرد در نظر باشد، استفاده کرد. در زمینه مدلسازی سه بعدی آزمایش بیرون کشیدن میلگرد تحقیقات سایر دانشمندان دانشگاه های ایتالیا [۲۵] و کانادا [۲۴] قابل توجه می باشد.

۸- نتیجه گیری

پس از آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بر روی نمونه های آزمایشگاهی متعدد و بدست آوردن بیشینه نیروهای نهایی، تنش پیوستگی میان میلگرد و بتن، بدست آمد. عواملی نظیر نوع و قطر میلگرد، به همراه نوع بتن، بر مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن موثر ارزیابی گردید. نتایج بررسیها نشان داد که میلگردهای فولادی دارای مقاومت پیوستگی بهتری نسبت به میلگردهای پلیمری در انواع بتن بوده اند؛ همچنین در بتن های خودتراکم با روانی بیشتر، مقاومت پیوستگی افزایش می یافت. همچنین با ازدیاد قطر میلگرد، مقاومت پیوستگی بیشتر می شد.

در خصوص تنش پیوستگی میلگردهای فولادی قرارگرفته در بتن های معمولی نزدیکترین مقدار به نتایج آزمایشگاهی، تنش پیوستگی حاصل از آئین نامه بتن آمریکا است. بطور کلی در مورد تنش پیوستگی میلگردهای پلیمری با بتن های خودتراکم روابط مشخصی وجود ندارد و مدلسازی اجزاء محدود از حالت مذکور ضروری به نظر رسید. در خصوص مدل سازی آزمایش بیرون کشیدن میلگرد با نرم افزار آباکوس این نتیجه حاصل آمد که اگر تنها اثر تغییرات طول میلگرد در تنش پیوستگی مد نظر باشد، میتوان از مدلسازی دو بعدی استفاده کرد. ولی در شرایطی که در نظر گرفتن اثر تغییر قطر و طول میلگرد به صورت همزمان در نظر باشد، فقط استفاده از مدلسازی سه بعدی مناسب است.

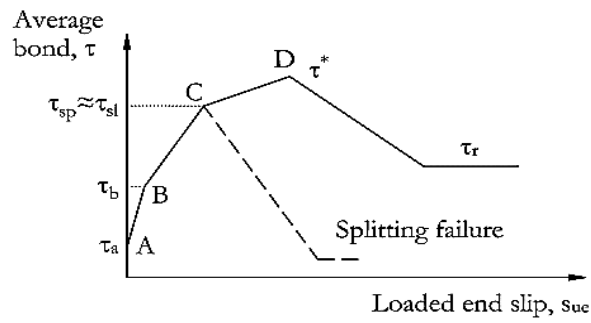
۹- معرفی نرم افزار

در این تحقیق از نرم افزار Abaqus 6/7 جهت شبیه سازی استفاده گردید.

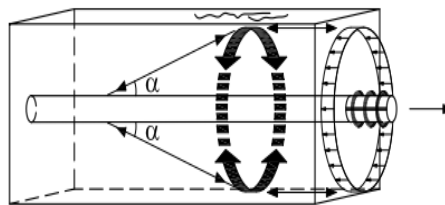
بعدی اعمال خواص به این قسمت ها است. خواص بتن، میلگرد و چسب، شامل Elastic، Density، Plasticity است. خواص پلاستیک، با سعی و خطا بر اساس نتایج آزمایشگاهی و برای یک حالت خاص بدست آمده است. خواص المانهای چسب به گونه ای انتخاب شده که نتایج نیرو- جابجایی میلگردها مشابه نتایج تجربی بدست آمده باشد. پس از اعمال خواص به قسمت های مختلف، آنها بر روی یک دیگر قرار می گیرند، به طوری که میلگرد در هسته مدل، قسمت چسب بر روی آن و نهایتاً بخش بتن بر روی چسب جای می گیرد. نحوه اعمال قیدها به مدل سه بعدی، شرایط مرزی و نحوه روی هم گذاری قطعات در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

شکل ۱۷ نتایج مربوط به مقایسه مدلسازی سه بعدی در خصوص میلگردهای فولادی را نشان می دهد. همانطور که در این اشکال مشخص است، با ازدیاد قطر در میلگردهای فولادی و پلیمری، نیروی بیرون کشیدگی میلگرد از داخل بتن، بیشتر میگردد. همانطور که ملاحظه می شود بیشترین نیرو، مربوط به میلگرد ST25، در گروه میلگردهای فولادی و همینطور در گروه میلگردهای پلیمری بیشترین نیرو مربوط به میلگرد پلیمری نمره ۲۵ می باشد. کرنش محوری الاستیک در آباکوس با LE33 نشان داده می شود. برای نمونه در مورد ST14 شکل ۱۸ بیانگر مقادیر کرنش محوری در فاصله ۴۰ سانتی متری از انتهای آزاد میلگرد می باشد.

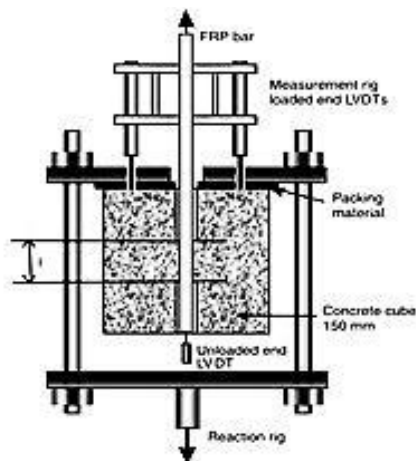
همانطور که در قسمتهای قبل اشاره گردید، یکی از مهمترین مزایای مدلسازی سه بعدی آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بررسی اثر تغییرات قطر و تغییرات طول میلگرد بر روی نیروی بیرون کشیدگی میلگرد از داخل بتن یا بررسی پیوستگی میان میلگرد و بتن می باشد. برای تمامی مدلسازی های انجام شده بار دیگر با تغییر طول میلگرد، تحلیل های مجددی بر روی مدلها انجام گرفت. به عنوان نمونه، میلگرد ST14 که در شکل ۱۸ کرنش محوری آن نشان داده شد، مجدداً پس از ازدیاد طول میلگرد، مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج کرنش در همان نقطه ۴۰ سانتیمتری از انتهای آزاد بدست آمد (شکل ۱۹). انتخاب نقطه ای در فاصله ۴۰ سانتی متری از قسمت انتهای آزاد میلگرد که جهت بررسی کرنش ها انجام گرفت، به این علت بوده است که کرنش سنجها در فاصله تقریبی ۴۰ سانتیمتری از پایین فک دستگاه قرار داشتند. با مقایسه شکل ۱۸ و ۱۹ مشاهده می شود که با ازدیاد طول میلگرد، کرنشهای طولی میلگرد بیشتر می گردد. سپس در مورد سایر میلگردهای مورد آزمایش، نتایج شبیه



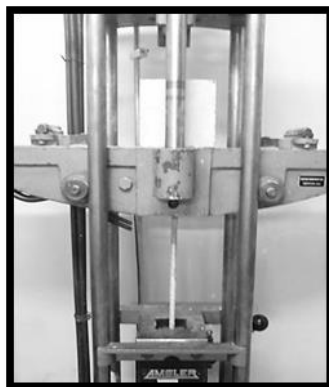
شکل ۱- منحنی تنش پیوستگی - لغزش در میلگرد پلیمری [۱]



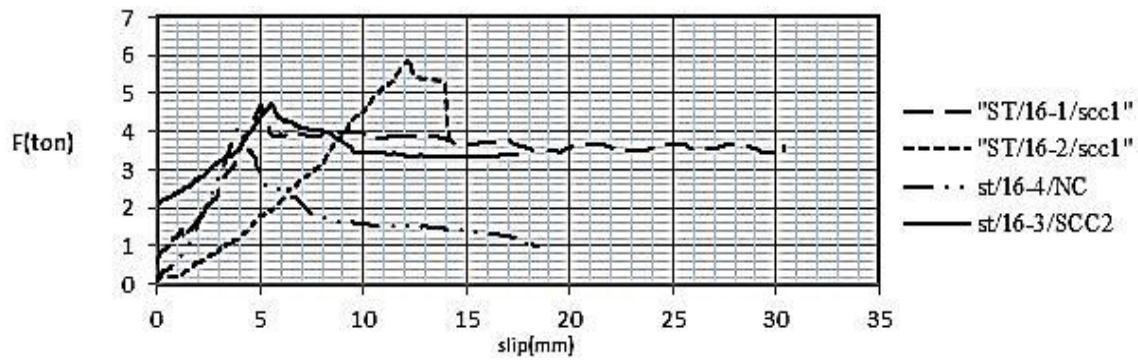
شکل ۲- تعادل نیروهای اتصال در برابر حلقه های تنش کششی [۱]



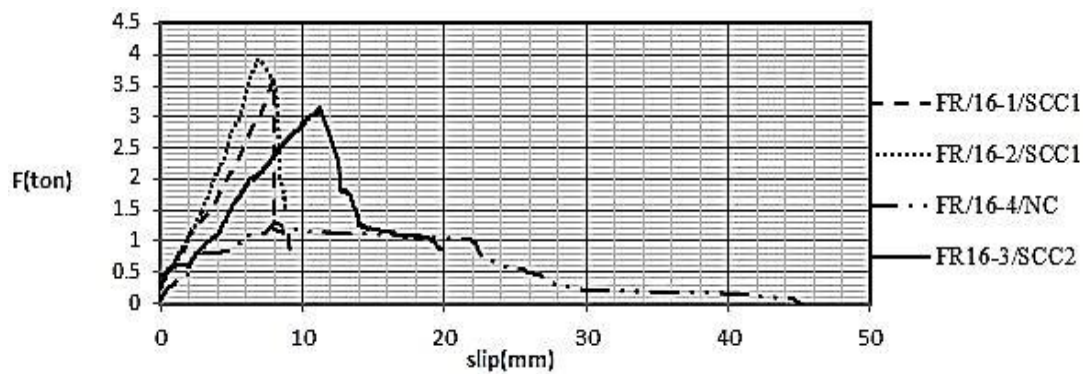
شکل ۳- وضعیت تجربی آزمایش بیرون کشیدن میله از بتن طبق ACI 440 [۷]



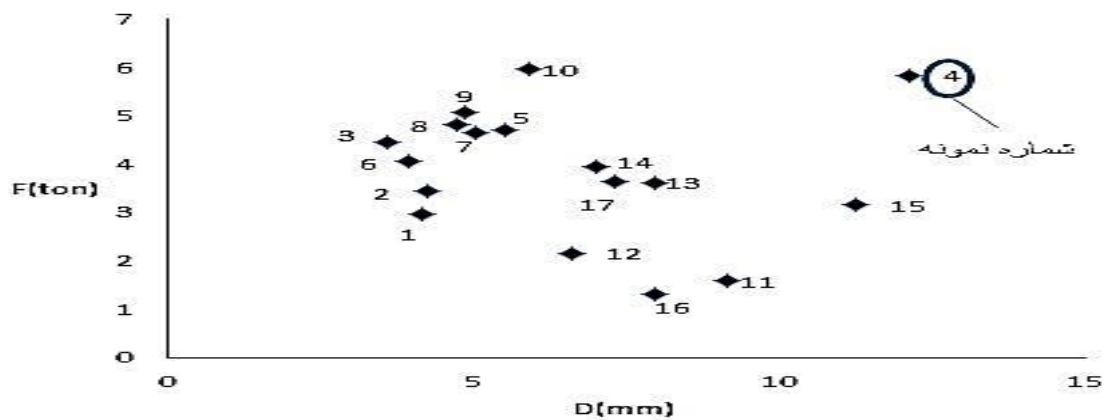
شکل ۴- نمای کلی دستگاه Universal



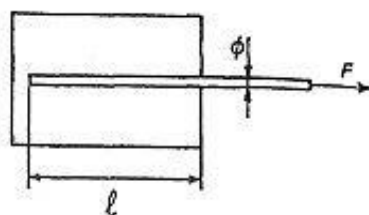
شکل ۵- نمودار نیرو - لغزش برای میلگرد فولادی نمره ۱۶ در انواع بتنهای آزمایشگاهی



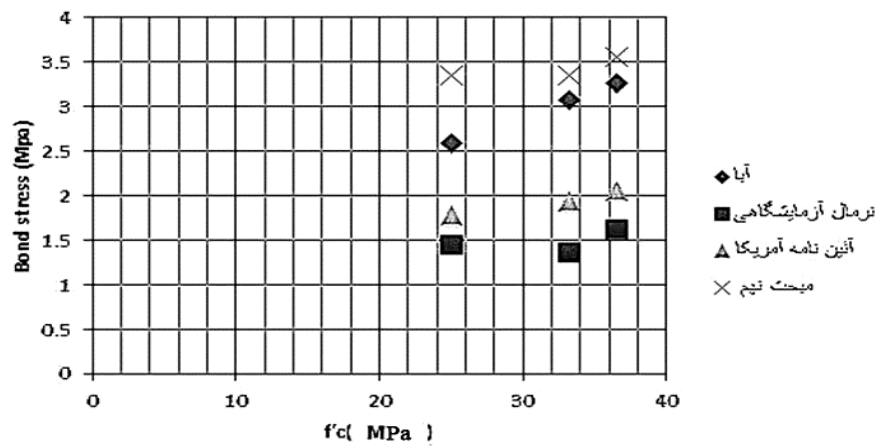
شکل ۶- نمودار نیرو - لغزش برای میلگرد پلیمری نمره ۱۶ در انواع بتنهای آزمایشگاهی



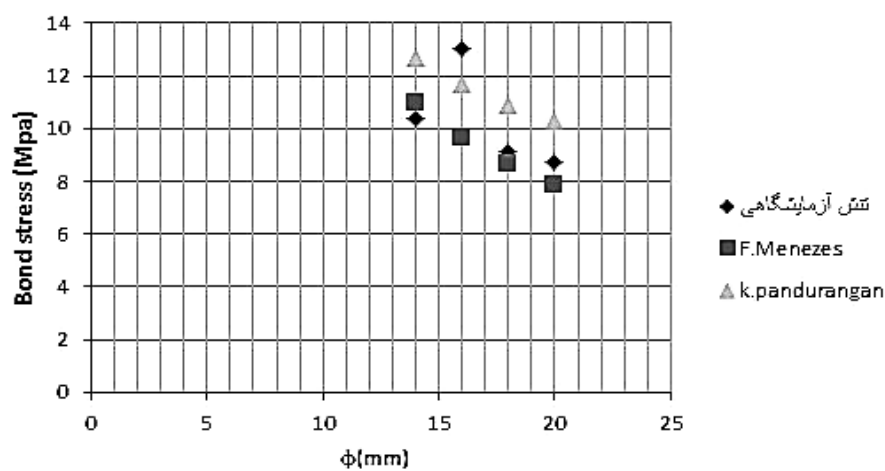
شکل ۷- نمودار نیرو - لغزش خروجی اصلاح شده دستگاه Universal جهت کلیه نمونه ها



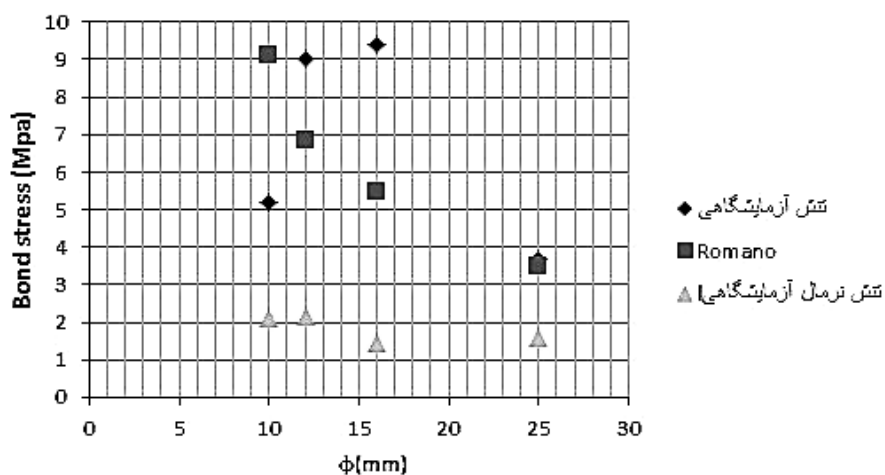
شکل ۸- نمایش کلی میلگرد داخل بتن جهت محاسبه تنش پیوستگی [۱۳]



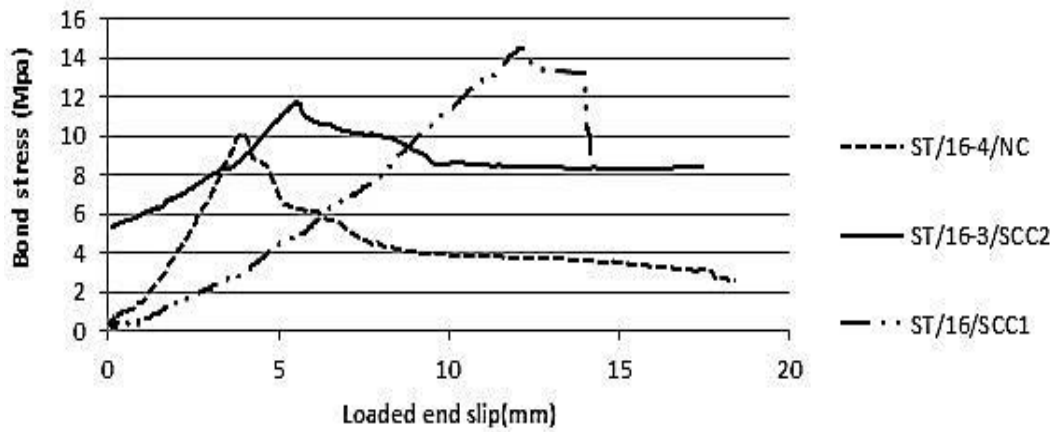
شکل ۹ - مقایسه نتایج تنش پیوستگی ماکزیمم آزمایشگاهی با سایر مراجع بر اساس مقاومت فشاری بتنهای مصرفی



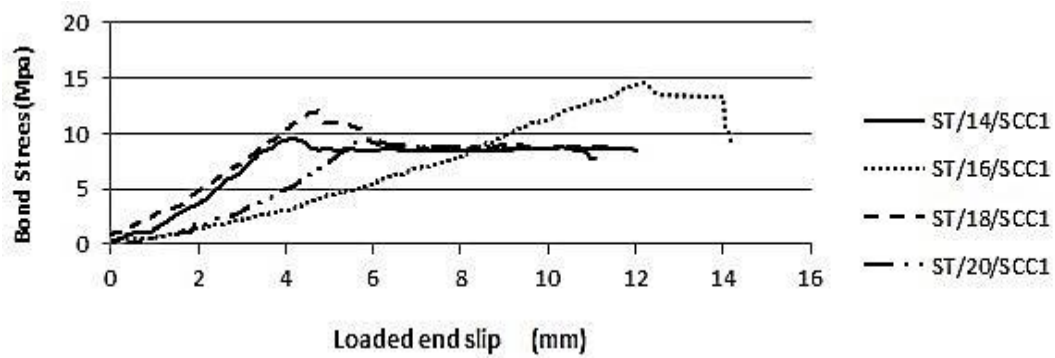
شکل ۱۰ - مقایسه نتایج تنش پیوستگی آزمایشگاهی با سایر مراجع بر اساس تغییرات قطر میلگرد فولادی



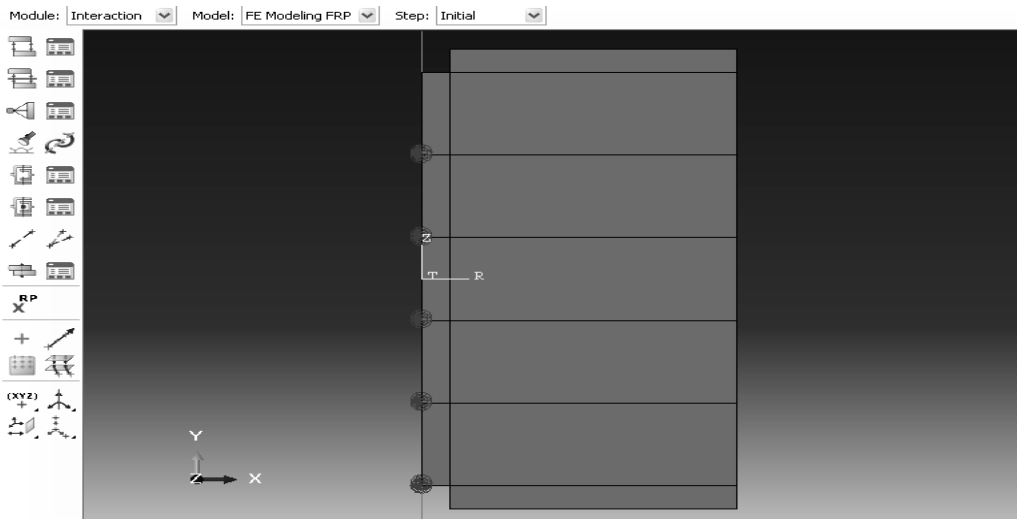
شکل ۱۱ - مقایسه نتایج تنش پیوستگی آزمایشگاهی با سایر مراجع بر اساس تغییرات قطر میلگرد پلیمری



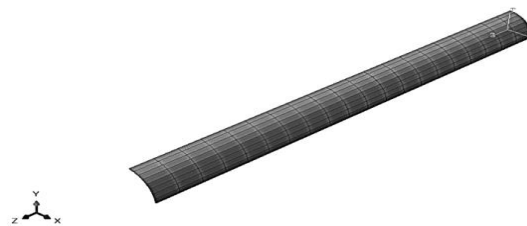
شکل ۱۲- نمودار تنش - لغزش میلگرد ST16 در بتن های SCC1 , SCC2 , NC



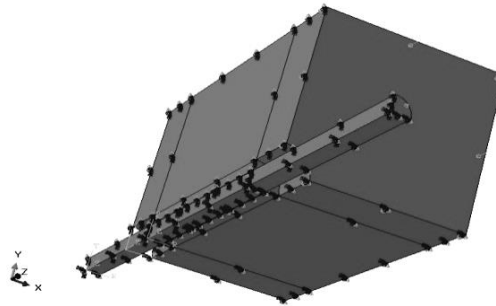
شکل ۱۳- نمودار تنش پیوستگی - لغزش میلگردهای فولادی در بتن SCC1



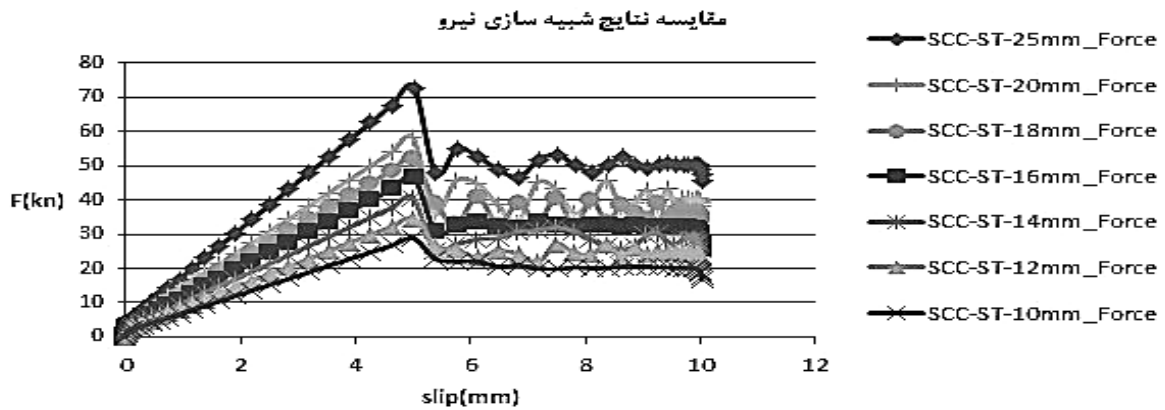
شکل ۱۴- نحوه قرارگیری فنرهای مرتبط بین بتن و میلگرد



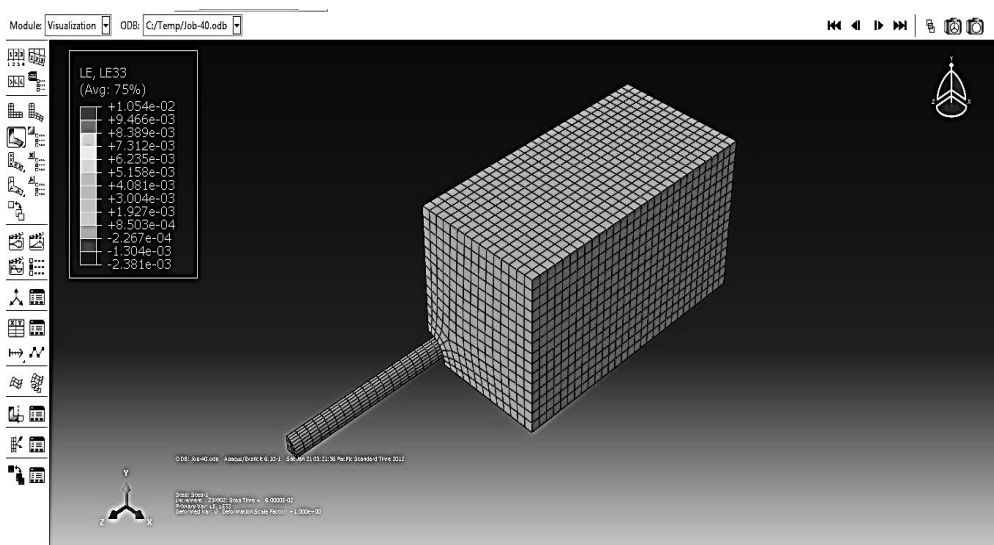
شکل (۱۵) - نحوه مش بندی المان چسب



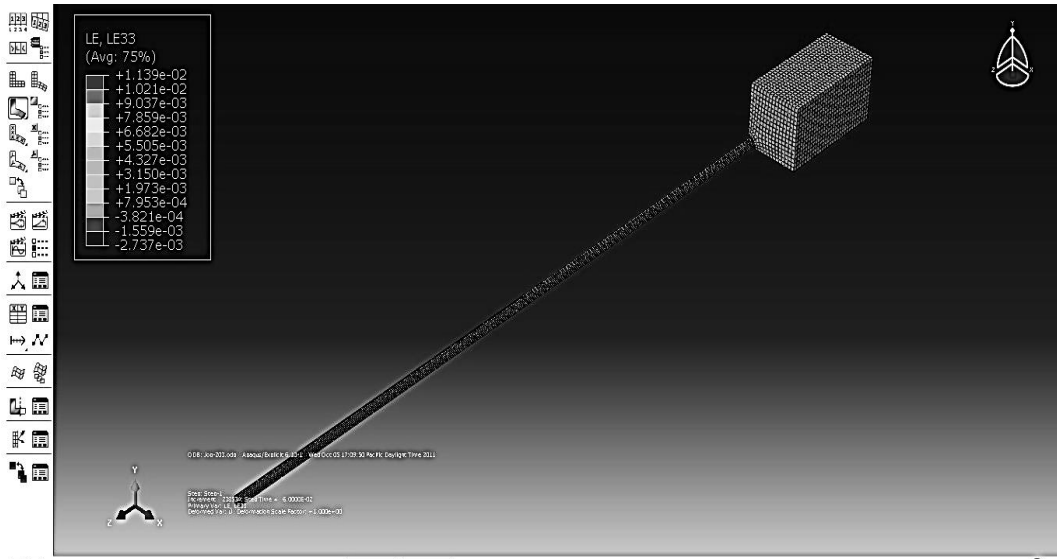
شکل ۱۶- نحوه سوار کردن سه قطعه (بتن، میلگرد و چسب) و اعمال قیدهای خروجی بین پارتهای مدل در نرم افزار آباکوس



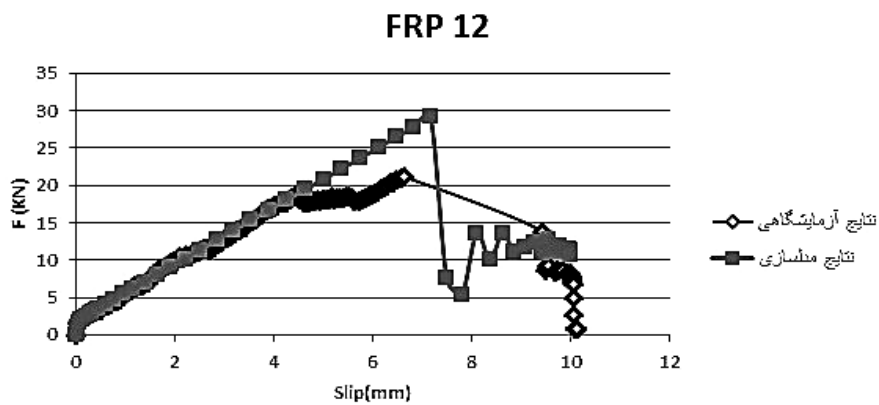
شکل ۱۷- نمودار نیرو - جابجائی حاصل از مدل سازی اجزاء محدود برای نمونه های STEEL



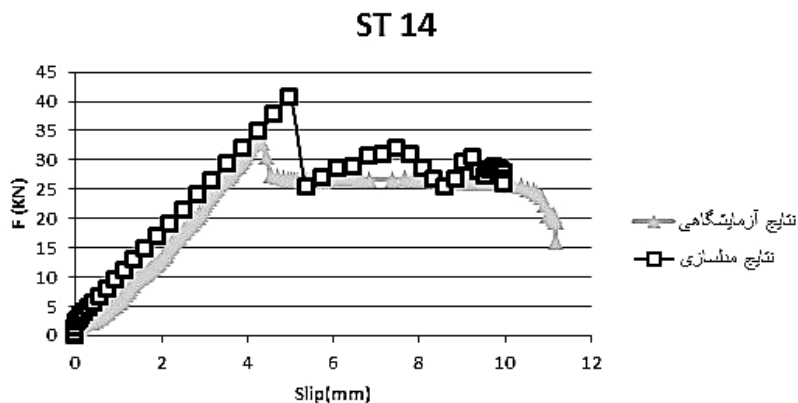
شکل ۱۸- نتایج کرنش محوری مدل اجزاء محدود در حالت طول کوتاه



شکل ۱۹- نتایج کرنش محوری مدل اجزاء محدود در حالت طول بلن



شکل ۲۰- مقایسه نتایج تحلیل شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی میلگرد پلیمری نمره ۱۲ (نمودار نیرو - لغزش)



شکل ۲۱- مقایسه نتایج تحلیل شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی میلگرد ST14 (نمودار نیرو - لغزش)

جدول ۱- نوع میلگردهای مصرفی در انواع بتنهای مورد آزمایش

ردیف	نام مصالح	شرح
۱	فوق روان کننده	ژلنیوم GLENIUM 110p
۲	پودر سنگ	پودر خاک سنگ آویشه
۳	آب	آب شرب خانگی
۴	سیمان	سیمان پرتلند خزر لوشان 1-425

جدول ۲- مصالح بتن های مصرفی

شماره طرح	نام طرح	نسبت آب به سیمان	مقدار آب (kg)	مقدار سیمان (kg)	مقدار فوق روان کننده (درصد وزن سیمان)	مقدار پودر سنگ (kg)	مقدار شن (kg)	مقدار ماسه (kg)
۱	SCC1	۰/۴۵	۱۸۰	۴۰۰	۱/۶%	۱۵۰	۸۳۳	۷۲۲
۲	SCC2	۰/۴۵	۱۸۰	۴۰۰	۰/۸%	۱۵۰	۸۳۳	۷۲۲
۳	NC	۰/۶	۲۲۵	۳۷۵	۰ %	۰	۸۰۱	۹۷۹

جدول ۳- طرح اختلاط بتن های مصرفی

نام نمونه	مقاومت بتن در سن ۲۸ روز (Mpa)	مقاومت بتن در سن ۷ روز (Mpa)	بیشینه بار فشاری در سن ۲۸ روز (kg)	بیشینه بار فشاری در سن ۷ روز (kg)
SCC1	۳۶/۵	۲۰/۶۱۰	۸۳۷۱۵	۴۷۳۲۰
SCC2	۳۳/۲	۲۱/۱۶۸	۷۶۱۴۶	۴۸۶۰۰
NC	۲۵	۱۶/۸۵۶۶	۵۷۳۹۷	۳۸۷۰۱

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی

ϕ	type bars	شماره طرح بتن	تعداد نمونه	F(y)	A_s	d_b
14	STEEL	۱	۲	۴۰۰	۱۵۴	۱۴
16	STEEL	۱	۲	۴۰۰	۲۰۱	۱۶
16	STEEL	۲	۱	۴۰۰	۲۰۱	۱۶
16	STEEL	۳	۱	۴۰۰	۲۰۱	۱۶
18	STEEL	۱	۲	۴۰۰	۲۵۴	۱۸
20	STEEL	۱	۲	۴۰۰	۳۱۴	۲۰
10	FRP	۱	۱	۹۰۰	۸۴/۳۲	۹/۵۳
12	FRP	۱	۱	۸۶۰	۱۴۴/۹	۲/۷
16	FRP	۱	۲	۴۰۰	۲۰۱	۱۶
16	FRP	۲	۱	۴۰۰	۲۰۱	۱۶
16	FRP	۳	۱	۸۰۰	۲۱۷/۶	۱۵/۸۸
25	FRP	۱	۱	۹۰۰	۳۴۶	۲۵

جدول ۵- بیشینه نیروی کششی و کرنش محوری میلگردها

UM	مشخصات نمونه	بیشینه لغزش (mm)	بیشینه نیروی کششی (ton)	بیشینه کرنش محوری
1	ST/14-1/SCC1	۴/۱۶	۲/۹۵۷	۰/۰۰۱۲۰۲
2	ST/14-2/SCC1	۴/۲۶	۳/۴۴	۰/۰۰۳۵۹۱
3	ST/16-1/SCC1	۵/۰۴	۴/۶۵۳	۰/۰۰۰۲۳۶
4	ST/16-2/SCC1	۱۲/۱۵	۵/۸۴۳	۰/۰۰۰۷۹۷
5	ST/16-3/SCC2	۵/۵۱	۴/۷۱۲	۰/۰۰۰۵۹۷
6	ST/16-4/NC	۳/۹۳	۴/۰۶۴	۰/۰۰۰۸۹۷
7	ST/18-1/SCC1	۳/۶۱	۴/۴۶۵	۰/۰۰۰۸۹
8	ST/18-2/SCC1	۴/۷۳	۴/۸۰۷	۰/۰۰۰۸۵۷
9	ST/20-1/SCC1	۴/۸۵	۵/۰۷۸	۰/۰۰۰۰۴۱
10	ST/20-2/SCC1	۵/۹۳	۵/۹۶۱	۰/۰۰۰۲۹۹
11	FR/10-1/SCC1	۹/۱۶	۱/۵۷۹	۰/۰۰۰۵۶۸۶
12	FR/12-1/SCC1	۶/۶۳	۲/۱۵۶	۰/۰۰۳۲۰۴
13	FR/16-1/SCC1	۷/۹۷	۳/۶۱۷	۰/۰۰۰۵۱۳۲
14	FR/16-2/SCC1	۷/۰۱	۳/۹۵۸	۰/۰۰۰۴۰۲۱
15	FR/16-3/SCC2	۱۱/۲۶	۳/۱۵۷	۰/۰۰۰۶۰۵۸
16	FR/16-4/NC	۷/۹۹	۱/۳۰۸	۰/۰۰۰۷۰۲۱
17	FR/25-1/SCC1	۷/۳۲	۳/۶۴	۰/۰۰۰۱۲۶۱

جدول ۶- تنش پیوستگی متوسط و ماکزیمم نمونه ها

num	مشخصات نمونه	$\sqrt{F'_c}$	Loaded end slip (mm)	F_{max} (N)	d_b (mm)	$l_d=5d_b$ (mm)	$A=\pi d_b l_d$ (mm ²)	$U=F_{max}/A$ (MPa)	$U'=U/\sqrt{F'_c}$
1	ST/14-1/SCC1	۶/۰۴	۴/۱۶	۲۹۵۷۰	۱۴	۷۰	۳۰۷۷/۲	۹/۶۰۹۳۸۵	۱/۵۹
2	ST/14-2/SCC1	۶/۰۴	۴/۲۶	۳۴۴۰۰	۱۴	۷۰	۳۰۷۷/۲	۱۱/۱۷۸۹۹	۱/۸۵
3	ST/16-1/SCC1	۶/۰۴	۵/۰۴	۴۶۵۳۰	۱۶	۸۰	۴۰۱۹/۲	۱۱/۵۷۶۹۳	۱/۹۲
4	ST/16-2/SCC1	۶/۰۴	۱۲/۱۵	۵۸۴۸۰	۱۶	۸۰	۴۰۱۹/۲	۱۴/۵۵۰۱۶	۲/۴۱
5	ST/16-3/SCC2	۵/۷۶	۵/۵۱	۴۷۱۲۰	۱۶	۸۰	۴۰۱۹/۲	۱۱/۷۲۳۷۳	۲/۰۳
6	ST/16-4/NC	۵	۳/۹۳	۴۰۶۴۰	۱۶	۸۰	۴۰۱۹/۲	۱۰/۱۱۱۴۶	۲/۰۲
7	ST/18-1/SCC1	۶/۰۴	۳/۶۱	۴۴۶۵۰	۱۸	۹۰	۵۰۸۶/۸	۸/۷۷۷۶۲۱	۱/۴۵
8	ST/18-2/SCC1	۶/۰۴	۴/۷۳	۴۸۰۷۰	۱۸	۹۰	۵۰۸۶/۸	۹/۴۴۹۴۹	۱/۵۶
9	ST/20-1/SCC1	۶/۰۴	۴/۸۵	۵۰۷۸۰	۲۰	۱۰۰	۶۲۸۰	۸/۰۸۵۹۸۷	۱/۳۴
10	ST/20-2/SCC1	۶/۰۴	۵/۹۳	۵۹۶۱۰	۲۰	۱۰۰	۶۲۸۰	۹/۴۹۲۰۳۸	۱/۵۷
11	FR/10-1/SCC1	۶/۰۴	۹/۱۶	۱۵۷۹۰	۹/۵۳	۴۷/۶۵	۱۴۲۵/۸۸۸	۱۱/۰۷۳۸	۱/۸۳
12	FR/12-1/SCC1	۶/۰۴	۶/۶۳	۲۱۵۶۰	۱۲/۷	۶۳/۵	۲۵۳۲/۲۵۳	۸/۵۱۴۱۵۷	۱/۴۱
13	FR/16-1/SCC1	۶/۰۴	۷/۹۷	۳۶۱۷۰	۱۵/۸۸	۷۹/۴	۳۹۵۹/۱۳۸	۹/۱۳۵۸۲۱	۱/۵۱
14	FR/16-2/SCC1	۶/۰۴	۷/۰۱	۳۹۵۸۰	۱۵/۸۸	۷۹/۴	۳۹۵۹/۱۳۸	۹/۹۹۷۱۲۵	۱/۶۶
15	FR/16-3/SCC2	۵/۷۶	۱۱/۲۶	۳۱۵۷۰	۱۵/۸۸	۷۹/۴	۳۹۵۹/۱۳۸	۷/۹۷۳۹۵۸	۱/۳۸
16	FR/16-4/NC	۵	۷/۹۹	۱۳۰۸۰	۱۵/۸۸	۷۹/۴	۳۹۵۹/۱۳۸	۳/۳۰۳۷۴۹	۰/۶۶
17	FR/25-1/SCC1	۶/۰۴	۷/۳۲	۳۶۴۰۰	۲۵	۱۲۵	۹۸۱۲/۵	۳/۷۰۹۵۵۴	۰/۶۱

۱۰- مراجع

Composites Science and Technology; Vol. 58, No. 8, pp. 1307– 1319, 1998.

Jendele, L. Cervenka, J., "Finite element modelling of reinforcement with bond", [۳] Computers and Structures; Vol. 84, No. 28, pp. 1780– 1791, 2006.

Achillides, Z. Pilakoutas, K., "FE modelling of bond interaction of FRP bars to concrete", [۱] Structural Concrete; Vol. 7, No. 1, pp. 7– 16, 2006.

Bakis, C.E. Uppuluri, V.S. Nanni, A., "Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete", [۲]

- [۴] Tvergaard, V., "Effect of fibre debonding in a whisker-reinforced metal", *Materials Science and Engineering*; Vol. 125, No. 2, pp. 203-213, 1990.
- [۵] Chaboche, J.L. Girard, R. Schaff, A., "Numerical analysis of composite systems by using interphase/interface models", *Computational Mechanics*, Vol. 11, No.3, 1997.
- [۶] Lin, G. Geubelle, P.H.. Sottos, N.R., "Simulation of fiber debonding with friction in a model composite push out test", *International Journal of Solid and Structures*; Vol. 38, No. 46- 47, pp. 8547- 8562, 2001 .
- [۷] Guide Test Methods for Fiber- Reinforced Polymers (FRPS) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures - ACI 440. 3R- 04, 2004.
- [۸] ASTM 944- 99 International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, United States, "Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens", pp. 19428- 2959, 2004.
- [۹] Avraham, N. Amnon, Katz ,Uri, Wexler, "Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers", *Materials and Structures* ; Vol. 43, No. 10, pp. 839- 856, 2010.
- [۱۰] Bamonte, PF. Gambarova, PG., "High-bond bars in NSC and HPC: study on size effect and on the local bond stress-slip law", *ASCE J Struct Eng* ;Vol. 133, No. 2, pp. 225- 234, 2007.
- [۱۱] Azizinamini, A. Stark, M. Roller, JJ. Ghosh, SK, "Bond performance of reinforcing bars embedded in high-strength concrete", *ACI Struct J* 90; Vol. 5, pp. 554- 561, 1993.
- [۱۲] Okamura, H., "Self-compacting high-performance concrete", *Concrete Int*; Vol. 19, No. 7, pp. 50- 54, 1997.
- [۱۳] رهایی، علیرضا، طراحی و محاسبه سازه های بتن مسلح ۲۴۰-۲۳۳، ۱۳۸۲.
- [۱۴] Harajli, M. Hamad, B. Karam, K., "Bond-slip Response of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Concrete", *Journal of materials in civil engineering*, pp. 503- 511, 2002.
- [۱۵] آیین نامه بتن ایران (آبا) ، تجدید نظر اول. ۳۴۷-۳۷۰، ۱۳۸۸.
- [۱۶] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه، ۲۵۹-۲۶۰، ۱۳۸۸.
- [۱۷] آیین نامه ACI 318-8-0 ، طراحی سازه های بتنی و تفسیر، ترجمه علی قربانی ۳۴۰-۳۱۶، ۱۳۸۷.
- [۱۸] [18] Khayat, K. H. Mitchell, D., "Self-Consolidating Concrete for Precast, Prestressed Concrete Bridge Elements", *NCHRP REPORT 628*. pp. 76- 80, 2007.
- [۱۹] Pandurangan, K. Kothandaraman, D. Sreedaran, S., "A study on the bond strength of tension lap splices in self compacting concrete", *Materials and Structures*; Vol. 43, pp. 1113- 1121, 2009.
- [۲۰] Menezes, F. Mounir, K., "Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests", *Materials and Structures*;Vol. 41. pp. 1073-1089, 2007.
- [۲۱] Okelo, R.Yuan, R.L., "Bond strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete", *Journal of composites for construction*;Vol. 203, 2005.
- [۲۲] Barbosa, MTG., "Evaluation of the behavior of the bond in ordinary and high strength concrete", *Doctoral Thesis, COPPE/UFRJ (in Portuguese)*, 2001.
- [۲۳] Chapman, RA. Shah, SP, "Early-age bond strength in reinforced concrete", *ACI Mater J*;Vol. 84, No. 6, pp. 501- 510.
- [۲۴] Kim, G.B. Pilakoutas, K. Waldron, P., "Finite element analysis of thin GFRC panels reinforced with FRP", *Construction and Building Materials*;Vol. 23. pp. 930- 942, 2009.
- [۲۵] Baena, M. Torres, L. Turon, A. Barris, C., "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test", *Analysis and Advanced Materials for Structural Design (AMADE)*, Polytechnic School, University of Girona, Campus Montilivi s/n, 17071 Girona, Spain, 2009.