



مطالعه آزمایشگاهی و عددی اثر قطر و مشخصات مکانیکی میلگرد تحت کشش در بتن

مسلح

محمد رضا داودی^۱، حسین فلاح‌نژاد^۲، سید رسول نبویان^۳، مهدی عبادی^۴

۱- استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- عضو هیئت علمی موسسه آموزش عالی طبری بابل

۴- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه سمنان

fallahnejad@stu.nit.ac.ir

خلاصه

یکی از مباحث مهم در طراحی میلگرد های بتن مسلح، مشخصات هندسی و فیزیکی آنهاست. این مشخصات بر روی نحوه توزیع تنش داخل میلگرد محبوس در بتن و پیوستگی بین سطح میلگرد با بتن و نیز پارامترهای مؤثر در رفتار بین میلگرد با بتن اطراف تاثیرگذار است. در این راستا انجام مطالعات عددی مبتنی بر روشهای اجزا محدود در کنار کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته میتواند کمک شایان توجهی به درک بهتر رفتار میلگردها در بتن مسلح کند. در این تحقیق اقدام به ساخت مدل آزمایشگاهی و نصب انواع سنسورها در نمونه بتن مسلح تحت نیروی کششی شد تا میزان تغییر مکانها و به عبارتی میزان کرنشها با دقت قابل قبولی در طول مسیر میلگرد اندازه گیری شوند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده میتوان گفت با افزایش قطر و بهبود خواص مکانیکی میلگردهای تحت کشش بر میزان مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن اضافه میشود.

کلمات کلیدی: بتن، میلگرد، شبیه سازی عددی، مقاومت پیوستگی، مدل آزمایشگاهی

۱- مقدمه

عامل اصلی در عملکرد یک قطعه بتنی مسلح به عنوان یک جسم یکپارچه، پیوستگی و چسبندگی کامل بین بتن و فولاد است. وقتی بتن مسلح در اثر تنشهای کششی، ترک می خورد تمام بار وارده در مقطع به میلگرد اثر می کند. تنش وارده بر میلگرد در طول مهاری از طریق پیوستگی بین بتن و فولاد به بتن منتقل می شود. همزمان با افزایش بار وارده، بین میلگرد و بتن لغزش اتفاق خواهد افتاد. تاکنون مطالعات تجربی و عددی متعددی در زمینه رابطه بین تنش و لغزش پیوستگی در بتن ارمه برای فولاد های مختلف انجام شده و منحنی های توزیع تنش - کرنش و لغزش پیوستگی ارائه شده و تاثیر مشخصات مختلف میله گردها بر رفتار بتن مسلح بررسی شده است.

Nilson [1] فاصله پهنای ترک ها و توزیع تنش بتن در اعضای نسبتا ترک خورده را مورد بررسی قرار داده که نشان داد تنش پیوستگی واقعی به طور چشمگیری در امتداد طول مدفون تغییر میکند و در ادامه این مطالعات Abrishami, Mitchel [2] روش جدیدی برای مدل کردن توزیع تنش پیوستگی یکنواخت ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که یک ترکیب مناسب از نیروهای بیرون کشیدگی و فشار به داخل می تواند توزیع تنش پیوستگی یکنواخت در امتداد میله گرد تقویتی مدفون شده در بتن را شبیه سازی نماید.

kan kam [3] تاثیر انقباض شعاعی آرماتور را بررسی کرد و روابطی را به صورت تجربی پیشنهاد نمود. اواز ضرابی استفاده نمود تا انواع مصالح را با این روابط تحت پوشش قرار دهد. Hota و همکارانش [4] ویژگی های سطح مشترک بین یک تار فولادی مستقیم و ۲ ماده ملاط (زمینه) و تاثیر بتن الیافی را بررسی کردند. طبق نتایج بدست آمده متوسط مقاومت پیوستگی سطح مشترک و متوسط سختی پیوستگی سطح مشترک برای یک ماده ملاط حاوی پلیمر تقریباً ۲ برابر مقادیر اندازه گیری شده با استفاده از ملات بدون پلیمر بودند. Koroneos, Tassios [5] رابطه تنش - لغزش پیوستگی محلی را به وسیله روش آزمایشگاهی نوری (Optical) (روش Moire) در حالات بارگذاری یکنواخت و دوره های مورد بررسی قرار دادند.

Ismail و همکارانش [6] تدریجی استهلاک پیوستگی، تحت بارهای دوره ای کم را توسط آزمایشات تیر مورد بررسی قرار دادند. و تحقیقات اتان نشان داد تنش های پیوستگی نمونه هایی که در آنها تنشهای فشاری اعمال شده بود، بیشتر و بزرگتر بودند. Bertero, Eligehousen Popov, [7] رابطه تنش - لغزش پیوستگی تحت بارگذاری دوره ای را با آزمایشات گسترده مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که منحنی هیستریسیس تنش - لغزش پیوستگی برای بارگذاری چرخه ای، بسیار نزدیک به منحنی حاصل شده از بارگذاری یکنواخت می باشد. J. Chan و Y. L. Mo [8]



مقاومت پیوستگی میله گرد ساده مدفون در بتن را در آزمایش کششی مورد بررسی قرار دادند. تاثیر نوع و قطر میله گرد، طول مهار، مقاومت بتن و نرخ بارگذاری بر روی رفتار پیوستگی آزمایش شدند.

Dux و Gajer [9]، به ارائه یک تئوری برای انرژی شکست مبتنی بر روش اجزا محدود برای بتن مسلح پرداختند که قابلیت در نظر گرفتن نرم شوندگی کرنش در فشار و کشش را دارد. آنها برای بررسی صحت مدل خود به چند آزمایش دست زدند و تطابق خوبی بین نتایج تئوریک و آزمایشگاهی را مشاهده کردند. در این مقاله، تاثیر مشخصات هندسی و مکانیکی میله گردهای آجدار بر مقدار کرنش و جابه جایی آنها در یک نمونه بتنی با ابعاد مشخص مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آزمایش با مقادیر حاصل از مدلسازی عددی نمونه ها مقایسه شد.

۲- مدل آزمایشگاهی:

۲-۱- نمونه ها:

نمونه ی بتنی با ابعاد $۳۰ \times ۵۰ \times ۸۰$ سانتی متر می باشد. میلگرد ها نیز از لحاظ مقاومت کششی از نوع A_2, A_3 از قطر ۱۰ تا قطر ۱۶ میلی متر انتخاب شده است و مجموعاً ۸ نمونه بتنی مسلح با میلگرد ساخته شد و در نهایت نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی مقایسه گردید. بدلیل اینکه آزمایش کشش روی میلگرد صورت می پذیرد، برای جلوگیری از انحراف میلگرد تحت کشش و همچنین پیشش توامان، از یک جفت میلگرد استفاده شده است تا نتیجه دقیق تری بدست آید.

۲-۲- مشخصات مصالح مصرفی:

سیمان مصرفی در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ با چگالی ۳۱۵۰ kg/m^3 می باشد. در این آزمایش از مواد افزودنی فوق کاهنده آب (HRWRA) که دارای پایه پلی کروکسیلاتی بوده استفاده شده است. سنگ دانه های درشت مصرفی از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ۲۵۴۰ kg/m^3 و جذب آب ۱.۸٪ است. هم چنین سنگ دانه های ریز مصرفی از نوع طبیعی شکسته با وزن مخصوص ۲۴۴۰ و جذب آب ۴.۱٪ است. به منظور ثابت نگه داشتن دانه بندی سنگ دانه ها در طول آزمایش، سنگ دانه ها در ۸ اندازه های ۱۹، ۱۲.۵، ۹.۵، ۴.۷۵، ۲.۳۶، ۱.۱۸، ۰.۶، ۰.۳ میلی متر الک شده و در ظروف مجزا تفکیک گردیدند. در بتن مورد استفاده در آزمایش کنونی، وزن مصرفی واحد حجم سیمان، سنگدانه ها و آب به ترتیب برابر با ۳۰۰ و ۱۷۳۰ و ۱۳۵ کیلوگرم می باشد. نسبت آب به سیمان برابر با ۰.۴۵ در نظر گرفته شد و همچنین به میزان ۰.۷ درصد حجمی سیمان مصرفی از فوق روان کننده استفاده شد. مشخصات مکانیکی میلگرد های مورد استفاده که از نوع A_2 و A_3 هستند در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی میلگردهای A_2, A_3

میلگرد	قطر (mm)	درصد ازدیاد طولی (mm)	حداقل تنش تسلیم (Mpa)	حداقل تنش نهایی (Mpa)
A2	6-40	15-19	294.12	490.2
A3	6-40	12-16	392.16	588.24

۲-۳- نحوه بارگذاری و اندازه گیری جابجایی در آزمایش:

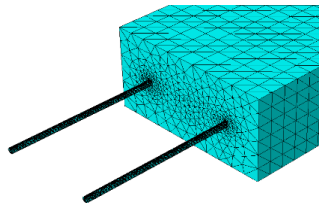
بارگذاری روی نمونه ها به صورت استاتیکی افزایش یافته بود که توسط پمپ هیدرولیکی و دستگاه لودسل به انتهای میله گردها وارد شد و برای کسب میزان جابجایی های میلگرد در راستای اعمال نیروی کششی تغییر مکان سنج هایی بر روی نمونه تعبیه شده است. برای نصب تغییر مکان سنج ها، از تکیه گاهی ثابت و مناسب روی میلگردهای اصلی استفاده شد که محل این میلگرد های شاخص به طول مهار میلگرد در بتن بستگی دارد. محل نصب LVDT در نمونه ۸۰ سانتی متری بتنی از انتهای میلگرد شروع میشود و اولین میلگرد شاخص روی میلگرد اصلی جوش خواهد شد. دومین شاخص در فاصله ۲۰ سانتی متری از شاخص دوم جوش خواهد شد. به همین منوال ادامه خواهد یافت و در نهایت ۵ شاخص روی میلگرد اصلی جوش خواهد شد. برای میلگرد اصلی طرف دوم نیز همین مراحل رعایت و ۲ میلگرد اصلی با رعایت فاصله عرضی مناسب (به طوری که پمپ هیدرولیک و لودسل مابین این دو قرار گیرد) در قالب چوبی نصب می شود. در شکل ۱ نمای کلی از نمونه آماده بارگذاری در آزمایش مشاهده میشود.



شکل ۱- نمای کلی از نمونه آماده بارگذاری

۳- مدل‌سازی عددی:

در مطالعه حاضر از چهار میلگرد با قطرهای ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۰ میلیمتر و بلوکهای بتنی با ابعاد $80 \times 50 \times 30$ سانتیمتر در مدل‌سازی عددی استفاده شده است. در مدل سه بعدی، اعضای اتصال با المان پیوسته شبکه بندی شده اند. شکل ۲ مدل المان محدود نمونه را نشان می‌دهد.

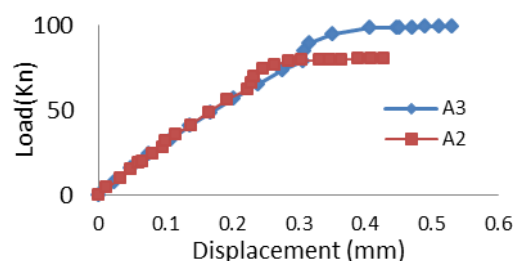


شکل ۲- مدل المان محدود نمونه آزمایشگاهی

لازم به ذکر است که در شبکه بندی مدل المان محدود اتصال مورد نظر، ۱۸۰۰۰ المان حجمی سری پیوسته بکار رفته است. در مدل المان محدود اتصال می‌توان تماس میان اعضای اتصال را مدل نمود. جهت مدل نمودن تماس میان سطوح تماسی از حالت تماس عمومی استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی خصوصیات میلگردهای فولادی اعضای اتصال، از ضریب پواسون ۰.۳ و مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰ مگا پاسکال و رفتار ارتجاعی - خمیری چند خطه با معیار تسلیم فون میسز، قانون جریان وابسته و قانون سخت شوندگی همسانگرد در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی خصوصیات بتن مورد استفاده در مدل‌سازی عددی برای رفتار الاستیک آن از ضریب پواسون ۰.۲ و مدول الاستیسیته ۱۸۰۰۰۰ مگا پاسکال استفاده کردیم. همچنین برای در نظر گرفتن صحیح رفتار ترک خوردگی بتن از مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن استفاده شده است.

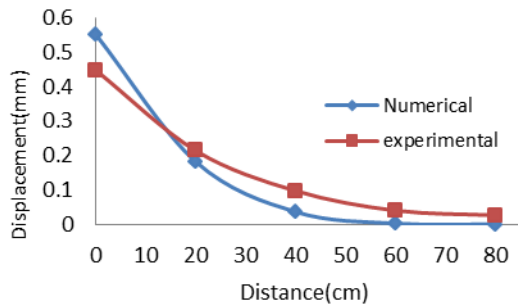
۴- نتایج:

نتایج در دو بخش میلگرد A2 و A3 ارائه شده اند و در هر نوع میلگرد نتایج با هم مقایسه شده اند. این نتایج شامل مقایسه بین منحنیهای تغییر مکان شاخص ها در نمونه بتنی در حالت آزمایشگاهی و عددی و همچنین مقایسه منحنیهای آزمایشگاهی نیرو- تغییر مکان نقطه انتهایی میباشد. در انتهای نتایج به بررسی اثر قطر میله گردها بر مقاومت پیوستگی بین بتن و میله گرد پرداخته شد. شکل ۳ مقایسه بین منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی را برای نقطه انتهایی دو نوع میلگرد A2 و A3 با قطر ۱۶ میلیمتر که به ترتیب تحت بار محوری ۸ و ۱۰ تن قرار گرفته است، نشان میدهد.

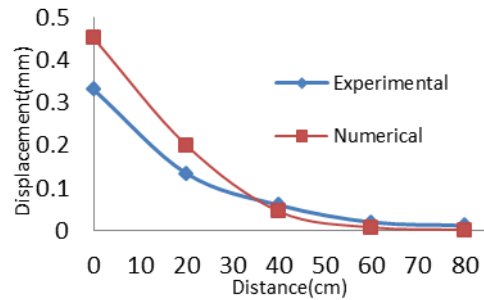


شکل ۳- منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی میلگرد به قطر ۱۶ میلی متر

در شکل‌های ۴ به ترتیب به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی عددی بدست آمده برای میلگرد ۱۶ میلی متری در دو حالت A2 و A3



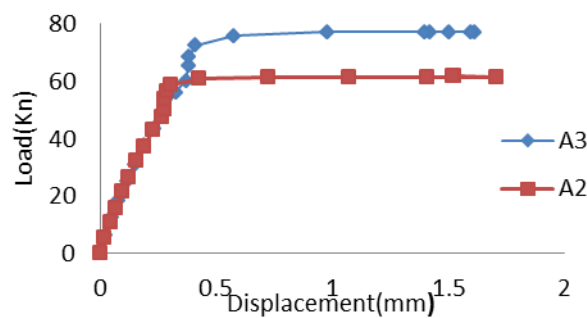
(الف)



(ب)

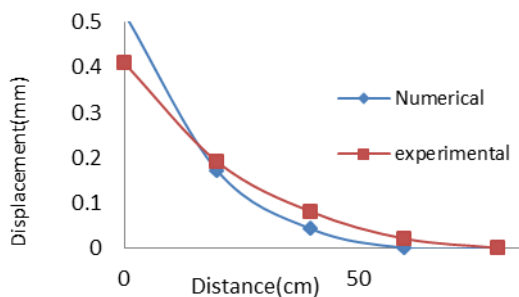
شکل ۴: مقایسه نمودار تغییر مکان نقاط مختلف بین آزمایشگاهی و عددی برای نمونه با الف: میله گرد A3 و ب: میله گرد A2

شکل ۵: مقایسه بین منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی را برای نقطه انتهایی دو نوع میلگرد A2 و A3 با قطر ۱۴ میلیمتر که به ترتیب تحت بار محوری ۸ و ۶ تن قرار گرفته است، نشان میدهد. با افزایش نیرو میزان تغییر شکل نیز افزایش یافته است ولی نسبت به میلگرد ۱۶ تاثیر افزایش طول مهاری بر تغییر شکل کاهش یافته است.

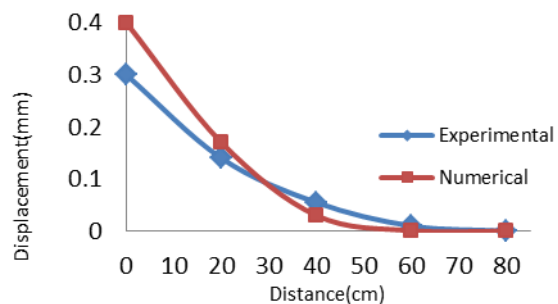


شکل ۵- منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی برای نقطه انتهایی میلگرد ۱۴ میلی متر

در شکلهای ۶ به ترتیب به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدلسازی عددی بدست آمده برای تغییر مکانهای نقاط مشخص شده روی میلگرد ۱۴ میلیمتری در دو حالت A2 و A3 پرداخته میشود.



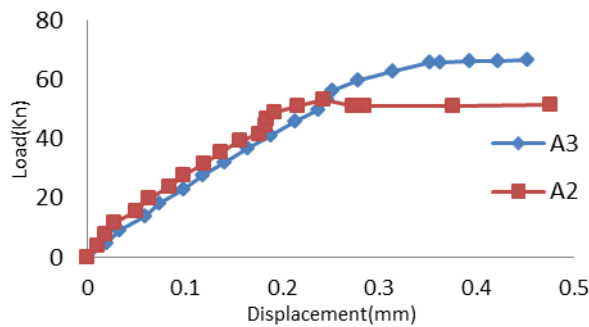
(الف)



(ب)

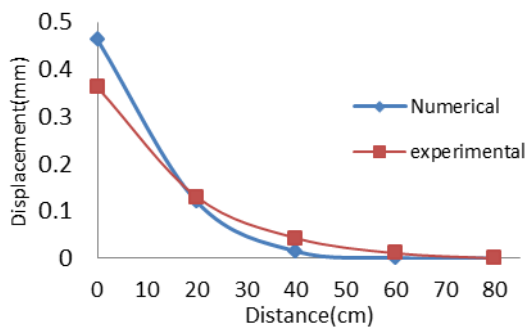
شکل ۶: مقایسه نمودار تغییر مکان نقاط مختلف بین آزمایشگاهی و عددی برای نمونه با الف: میله گرد A3 و ب: میله گرد A2

شکل ۷ مقایسه بین منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی را برای نقطه انتهایی دو نوع میلگرد A2 و A3 با قطر ۱۲ میلیمتر که به ترتیب تحت بار محوری ۵ و ۶ تن قرار گرفته است، نشان می‌دهد.

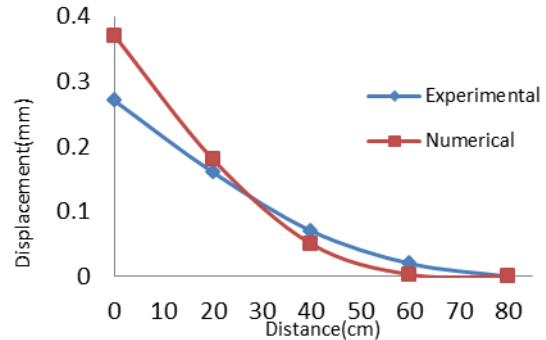


شکل ۷- منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی برای نقطه انتهایی میلگرد ۱۲ میلی متر

در شکل‌های ۸ به ترتیب به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی عددی بدست آمده برای تغییر مکانهای نقاط مشخص شده روی میلگرد ۱۲ میلی متری در دو حالت A2 و A3 پرداخته میشود.



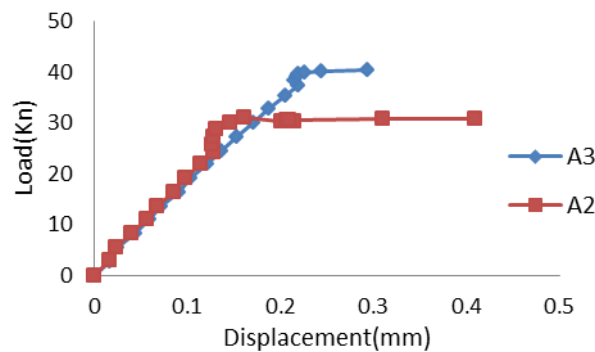
(الف)



(ب)

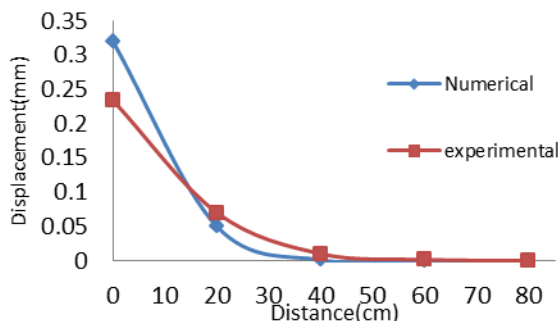
شکل ۸- مقایسه نمودار تغییر مکان نقاط مختلف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نمونه با الف: میلگرد A3 و ب: میلگرد A2

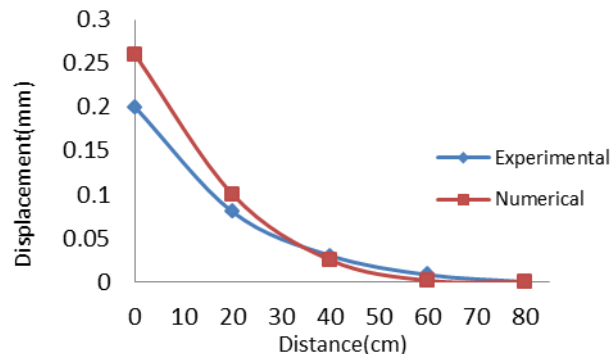
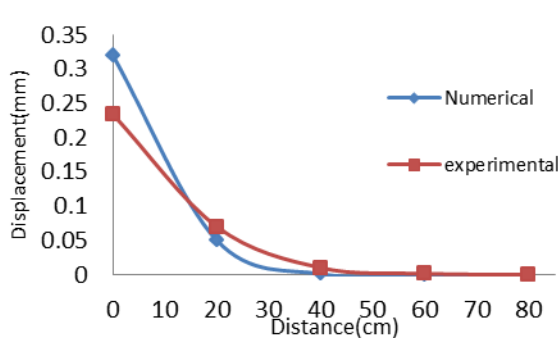
شکل ۹ مقایسه بین منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی را برای نقطه انتهایی دو نوع میلگرد A2 و A3 با قطر ۱۰ میلیمتر که به ترتیب تحت بار محوری ۳ و ۴ تن قرار گرفته است، نشان می‌دهد.



شکل ۹- منحنی های نیرو - جابجایی آزمایشگاهی برای نقطه انتهایی میلگرد ۱۰ میلی متر

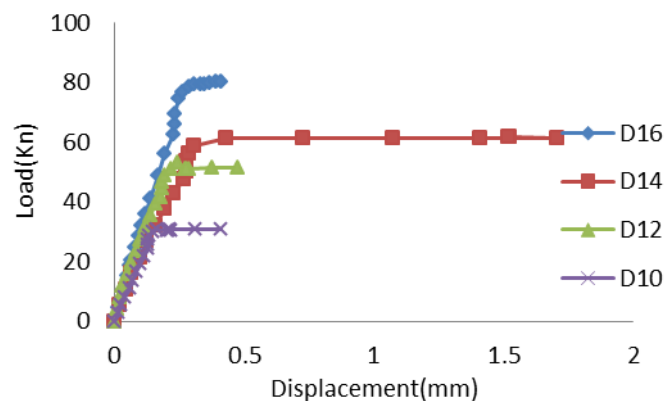
در شکل‌های ۱۰ به ترتیب به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی عددی بدست آمده برای تغییر مکانهای نقاط مشخص شده روی میلگرد ۱۰ میلی متری در دو حالت A2 و A3 پرداخته میشود.





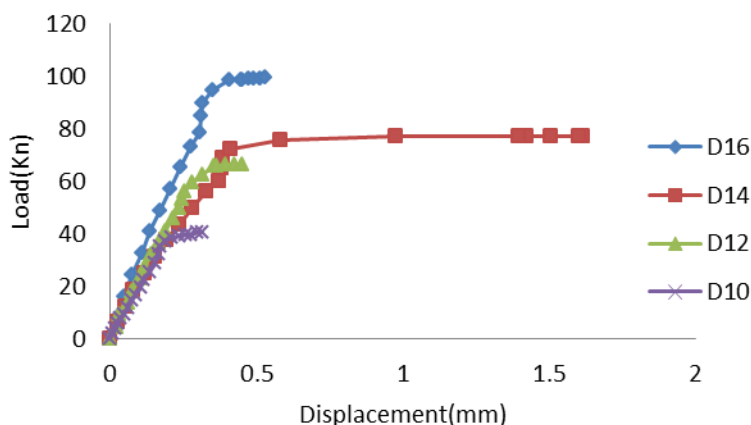
شکل ۱۰- مقایسه نمودار تغییر مکان نقاط مختلف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نمونه با الف: میلگرد A3 و ب: میلگرد A2

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تاثیر افزایش قطر میلگرد را بر مقاومت پیوستگی لغزش نشان می‌دهند. همانگونه که مشخص است هم در میلگرد A2 و هم در میلگرد A3 با افزایش قطر مقدار نیروی لازم برای ایجاد یک تغییر مکان معین افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱ - تاثیر قطر میلگرد A2 بر مقاومت پیوستگی لغزش

با توجه به نمودار فوق تحت نیروی محوری کمتر از ۱ تن تغییر مکانها با هم تطبیق خوبی دارد اما با افزایش نیرو ملاحظه می‌شود که سه نمونه میلگرد ۱۴، ۱۲ و ۱۰ تغییر مکانهای نسبتاً یکسان و بیشتری از میلگرد با قطر ۱۶ میلیمتر دارند که این اتفاق تا محدوده ۳ تن دیده می‌شود. با کمی افزایش نیرو تا ۵ تن روند افزایش تغییر مکان در مورد میلگردهای ۱۲ و ۱۴ معکوس دیده می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که میلگرد ۱۴ دارای تغییر مکان کمتری نسبت به میلگرد ۱۲ میلیمتر باشد.



شکل ۱۲- تاثیر قطر میلگرد A3 بر مقاومت پیوستگی لغزش

با افزایش مقاومت تسلیم میلگرد و جایگزین میلگرد نوع A3 بجای میلگرد نوع A2 مشاهده می شود که تا محدوده ی ۱۰ کیلو نیوتن تغییر مکانها تقریبا برابرند. اما با افزایش نیرو تغییر مکان میلگرد ۱۰ میلیمتر از بقیه میلگردها بیشتر می شود و فاصله می گیرد. همچنین تغییر مکان دو میلگرد ۱۲ و ۱۴ میلیمتر تا محدوده ۵۰ کیلونیوتن تطبیق خوبی دارند اما همچنان روند معکوس را می توان در محدوده ی بالاتری از نیرو در مورد دو میلگرد ۱۲ و ۱۴ میلیمتر مشاهده کرد.

۵- نتیجه گیری:

در این پژوهش مجموعا ۸ نمونه بتنی مسلح با ابعاد $80 \times 50 \times 30$ سانتی متر و با میلگرد های از نوع A_2, A_3 از قطر ۱۰ تا قطر ۱۶ ساخته شده و مورد آزمایش کششی قرار گرفتند و نتایج حاصل از آزمایش با نتایج مدلسازی عددی مقایسه گردید. به طور خلاصه نتایج کلی ارائه شده در زیر گرفته شد.
- در تمام موارد تغییر مکان نقطه اعمال بار کششی در حالت عددی نسبت به مورد آزمایشگاهی در حدود ۱۰٪ بیشتر بود ولی به تدریج از ایستگاههای دوم تا پنجم، تغییر مکان حالت آزمایشگاهی از حالت عددی بیشتر شد.
- با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده میتوان گفت با افزایش قطر و بهبود خواص مکانیکی میله گردهای تحت کشش بر میزان مقاومت پیوستگی بین میله گرد و بتن اضافه میشود.

۶- مراجع

- [1] Nilson, A.H. (1972): "Internal Measurement of Bond Slip", ACI Journal, 69(7), pp. 439-441
- [2] Abrishami, H. H. and Mitchell, D., 1996. "Analysis of Bond Stress Distributions in Pull-out Specimens", Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 255-261.
- [3] Kankam, C. K. (1997): "Relationship of bond stress, steel stress, and slip in reinforced concrete", Journal of the Structural Division, ASCE 123(1), pp. 79-85
- [4] Hota, S., and Naaman, A. E., 1997. "Bond Stress-Slip Response of Reinforcing Bars Embedded in FRC Matrices under Monotonic and Cyclic Loading", ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, September-October, pp. 525-537.
- [5] Tassios, T.P., Koroneos, E.G. (1984): "Local bond-slip by means of the moiré method", ACI Structural Journal, 81(4), pp. 27-34
- [6] Ismail, M. A. F., and Jirsa, J. O., 1972. "Bond Deterioration of Reinforced Concrete Subject to Low Cycle Loads", ACI Journal, Vol. 69, No. 6, June, pp. 334-343.



- [7] Eligeliasen, R., Popov, E., and Bertero, V., 1983. "Local Bond Stress-Slip Relationship of Deformed Bars under Generalized Excitations", Report No. UCBEERC-83/23, Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.
- [8] Y. L. Mo, J. Chan., 1996. "Bond and Slip of Plain Rebars in Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 208-211.
- [9] Gajer, G., and Dux, P. F., 1990. "Crack Band Based Model for FEM Analysis of Concrete Structures", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 6, June, 1696-1714.