

بررسی و مقایسه تاثیر طول لوله های شیشه ای محتوی چسب پلی اورتان در عملکرد ترمیم در بتن های خودترمیمی

محدثه انبارلویی^۱، مهدی مهدیخانی^۲، امیر ملکی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۲- عضو هیئت علمی و استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت استراتژیک دانشگاه تهران

mohadese.anbarlouie@yahoo.com

چکیده

امروزه بتن به عنوان یکی از مصالح اصلی در صنعت ساخت و ساز به شمار می آید. تمایل صنعت به استفاده از مصالح بتنی منجر به انجام تحقیقات متعددی در زمینه اصلاح معایب و ترمیم ترک های آن به منظور جلوگیری از تخریب بتن شده است. یکی از عوامل ایجاد ترک در ساختمان ها که کمتر مورد توجه طراحان سازه قرار می گیرد، پیچش است. پیچش در سازه های بتن مسلح معمولا در اثر یکپارچگی و پیوستگی اعضا به وجود می آید. یکی از روش های موجود برای ترمیم بتن، استفاده از لوله های شیشه ای محتوی پلی اورتان در داخل بتن و ساخت بتن خودترمیم شونده است که محققان زیادی به آزمایش و تجربه در این زمینه پرداخته اند. در این پژوهش با ساخت دستگاه پیچشی اقدام به بارگذاری تیرهای بتنی خودترمیم شونده محتوی لوله های شیشه ای به طول ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متر شد و سپس به مقایسه تاثیر طول لوله در عملکرد ترمیم و مقایسه بتن ترمیم شده با نمونه شاهد پرداخته شد. در پایان نتیجه گرفته شد که استفاده از بتن خودترمیم شونده محتوی لوله های شیشه ای حاوی پلی اورتان قادر به افزایش ظرفیت پیچشی باقی مانده در بتن ترک خورده می باشد لیکن استفاده از بتن خودترمیم شونده محتوی لوله های شیشه ای به طول ۱۰۰ سانتی متر به علت عدم وجود فضای خالی بین قطعات لوله که در یک راستا قرار گرفته اند و اینکه عیور ترک از هر محل احتمال شکستگی لوله ها را به همراه دارد از مزیت بیشتری نسبت به استفاده از بتن خودترمیم شونده محتوی لوله های شیشه ای به طول ۱۰ سانتی متر برخوردار است.

واژگان کلیدی: بتن خودترمیم شونده، لوله های شیشه ای، چسب پلی اورتان، بتن خودمتراکم، پیچش

۱. مقدمه

یکی از مشکلات قابل توجه و پراهمیت در زمینه بتن، به وجود آمدن ترک هایی به طول ها و ابعاد متفاوت بر روی سطح آن در اثر وارد آمدن نیروی پیچشی و خمشی است. لذا اگر از گسترش این گونه ترک ها توسط روش های مختلف، به موقع جلوگیری به عمل نیاید سبب تخریب و واژگونی کامل سازه بتنی می گردد که پیامدهایی از جمله در خطر بودن جان افراد و هزینه های گزاف برای ساخت مجدد قطعه را بر جای می گذارد.

عمر مفید سازه های بتن مسلح به خصوص سازه های دریایی و پل ها به طور معمول توسط خوردگی آرماتور محدود می شود. خوردگی آرماتور باعث شکل گیری محصولات خوردگی در اطراف آرماتور شده و افزایش حجم این محصولات باعث ایجاد فشار

انبساطی در بتن اطراف آرماتورها می‌گردد. این فشار انبساطی موجب ترک خوردگی و پوکیدن پوشش بتنی شده و از بین رفتن پوشش بتنی باعث کاهش سطح مقطع بتن، کاهش مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور و همچنین قرار گرفتن آرماتور در معرض عوامل جوی می‌شود. بنابراین با متلاشی شدن پوشش بتنی، مقاومت پیوستگی به شدت کاهش یافته و با افزایش خوردگی عمر مفید سازه پایان می‌یابد.

اثرات ظهور ترک بر سازه‌های بتنی به شرح زیر می‌باشد:

۱- از لحاظ زیبایی غیر قابل قبول هستند.

۲- سبب خروج سازه از حالت آب‌بندی می‌شوند.

۳- بر دوام سازه اثر می‌گذارند.

۴- از لحاظ سازه‌ای اهمیت دارند. [۹]

اهمیت ترک‌ها بستگی به نوع سازه و نوع ترک خوردگی دارد. انواع ترک‌هایی که برای سازه‌های ساختمانی قابل قبول می‌باشند ممکن است برای سازه‌های دیوار حائل آبی، قابل قبول نباشند. تعمیر مناسب ترک‌ها بستگی به دانستن علت آن‌ها و انتخاب مراحل تعمیر متناسب با این علت‌ها دارد. همان‌طور که مطرح شد عامل پیچش در بتن و سازه‌های بتنی سبب ایجاد ترک در بتن می‌گردد، دانشنامه ویکی‌پدیا در مکانیک جامدات، پیچش را تغییر شکل مقطع جسم در اثر وارد آمدن گشتاور تعریف می‌کند [۱۰] در سازه‌های بتن مسلح نامعین پایدار، لنگر پیچشی تنها در صورتی قابل اندازه‌گیری است که سختی پیچشی اعضای بتن مسلح مشخص باشد. در یک سازه معین پایدار مانند یک دال طره‌ای بالکنی، لنگر پیچشی (استاتیکی) را می‌توان به تنهایی از معادلات تعادل به دست آورده و بدون هیچ‌گونه مشکل ضوابط آیین نامه را به کار گرفت، لیکن محاسبه لنگر پیچشی در یک سازه‌ی نامعین پایدار شبیه یک تیر محیطی، علاوه بر معادلات تعادل نیازمند شرایط سازگاری است به عبارت دیگر بایستی سختی پیچشی تیر محیطی نیز در نظر گرفته شود [۱]

پیچش در سازه‌های بتن مسلح معمولاً در اثر یکپارچگی و پیوستگی اعضا به وجود می‌آید. به همین علت در ابتدای امر این موضوع کمتر مورد توجه طراحان سازه‌های بتنی قرار می‌گرفت. در واقع پیچش به عنوان یک موضوع ثانویه تلقی می‌شد. در نتیجه تاثیر آن در طراحی، تنها به صورت اتکا به ضریب اطمینان بزرگی که معمولاً در روش‌های محاسباتی به کار می‌رفت، مشاهده می‌شد.

در سال‌های اخیر لزوم توجه به اثر پیچش و طراحی برای آن مورد تاکید فراوان قرار گرفته و ضوابط خاص مربوط به آن در هر آیین‌نامه‌ای بخش قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. برای این تغییر دو علت اساسی وجود دارد، اول آن‌که امروزه، روش‌های طراحی نسبت به روش‌های قدیمی بر مبنای واقع بینانه تری از بارها و رفتار سازه استوارند و در نتیجه ضریب اطمینان کوچکتری برای طرح حکم‌فرماست و دوم آنکه امروزه تعداد و نوع سازه‌هایی که در آن‌ها پیچش، محور رفتار سازه، و نه فقط یک اثر ثانویه است، رو به گسترش است. [۱]

حال اگر به دلیلی ترک‌هایی بر سطح بتن ایجاد گردد، باید درصد ترمیم آن‌ها برآییم. روش‌های متعددی برای ترمیم و بازسازی ترک در بتن وجود دارد که از جمله آن موارد می‌توان به

__ تزریق اپوکسی به داخل ترک

__ استفاده از ملات گروت

__ استفاده از FRP

- ژاکت کردن تیر بتنی

اشاره کرد.

علاوه بر روش‌های فوق استفاده از بتن خودترمیم شونده یک نوع روش دیگری است که هنگام ساخت بتن و قبل از عمل‌آوری آن صورت می‌گیرد تا به محض ایجاد ترک، مکانیسم ترمیم به‌صورت خودکار شروع گردد. خاصیت خودترمیمی

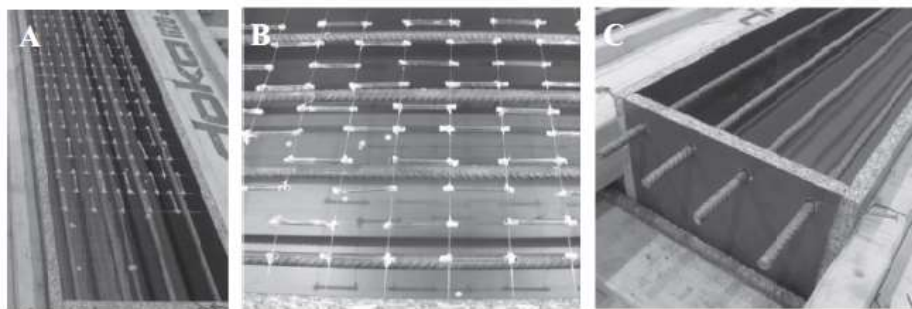
ترک‌ها در بتن، امروزه به موضوع پژوهشی بسیار جذابی تبدیل شده است. در انتخاب روش ترمیم ترک علاوه بر توجه به علت و وسعت ترک برداری، باید به وضعیت فعلی ترک ها هم توجه کرد. در غیر این صورت چه بسا روش ترمیمی، نامناسب و در نتیجه ناموثر انتخاب شود. انتخاب روش ترمیم نه تنها از علت و وسعت ترک، بلکه از محل و شرایط محیطی حضور ترک نیز تاثیر می‌پذیرد. [۳]

در این پژوهش هدف این است که با ساخت تیرهای بتنی آرمه محتوی لوله‌های شیشه ای به طول‌های ۱۰ و ۱۰۰ سانتی به بررسی و مقایسه تاثیر طول لوله های شیشه ای محتوی چسب پلی اورتان در عملکرد ترمیم در بتن های خودترمیمی پردازیم.

۲. مبانی تحقیق

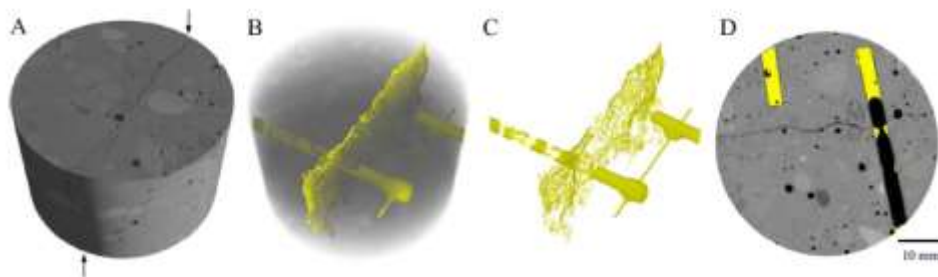
تحقیقات و پژوهش‌های زیادی در زمینه انواع روش های خودترمیمی صورت گرفته است که از جمله از آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

در سال‌های اخیر مواد بتنی جدید (بتن خودترمیم شونده) معرفی گردیدند. عملکرد بتن‌های خودترمیم شونده بر این روال بود که با ترمیم مداوم و نگهداری از ترک‌های ریز حاصله، به‌هیچ وجه اجازه گسترش ترک و ایجاد شکاف عمیق در بتن را نمی‌داند. طی تحقیقی که در آزمایشگاه مگنل برای ایجاد بتنی با ساختار خودترمیم شونده انجام گردید، سه نمونه تیر بتن آرمه ساخته شد که در داخل یکی از آن‌ها از کپسول های پلیمری محتوی پلی اورتان به عنوان یک ماده ترمیمی استفاده شده بود (شکل ۱). در نمونه دیگر از پلیمرهای سوپر جاذب آب به عنوان افزودنی به بتن تازه استفاده شده بود تا بتواند با جذب آب اضافه مانع از گسترش ترک ها و تخریب ناگهانی بتن گردد و از نمونه سوم نیز به عنوان نمونه شاهد استفاده شده بود. پس از قرار گرفتن این سه نمونه تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای و وارد نمودن سیکل بارگذاری و باربرداری خمشی ترک‌هایی بر روی نمونه ها حادث گردید و هرکدام از نمونه‌ها با توجه به مکانیزم ترمیمی تعبیه شده در بتن، عمل ترمیم را انجام دادند. نمونه‌ی محتوی کپسول با شکستن کپسول ها و آزاد شدن چسب داخل آن و قرار گرفتن در داخل ترک های حادث شده عملیات ترمیم را آغاز نمود (شکل ۲). در نهایت مغزه هایی از این نمونه ها گرفته شد و بررسی های میکروسکوپی ای صورت گرفت، و این نتیجه گرفته شد که استفاده از کپسول‌های پلیمری بین روش‌های مذکور موثرترین عامل برای ترمیم ترک می باشد [۴]



شکل ۱- چیدمان کپسول های شیشه ای محتوی چسب پلی اورتان به عنوان ماده خودترمیمی در تیر بتن آرمه

[۴]



شکل ۲- شکستن شیشه های محتوی پلی اورتان و خروج چسب از داخل آن ها و پر کردن ترک های ایجاد شده ناشی از خمش [۴]

Roig Flores و همکارانش مقاله ای را منتشر کردند و در آن بر روی ظرفیت خود ترمیم شونده بر روی بتنی که با فیبر تقویت شده بود مطالعه و تحقیق نمودند. آن ها همچنین تاثیر افزودنی های کریستالی را نیز به عنوان عامل ترمیمی مورد بررسی قرار دادند و این نتیجه را گرفتند که نمونه های بتنی ای که دارای افزودنی های کریستالی هستند، پارامتر نسبت ترمیمی در آن ها، از انحراف معیار کمتری نسبت به سایر نمونه ها برخوردار است. [۵]

در مقاله ای که توسط Qureshi و همکارانش منتشر گردید با هدف بررسی استفاده از مواد معدنی به عنوان عامل خود ترمیم شونده به صورت محصور شده در داخل کپسول های شیشه ای متحد المركز جاسازی شده در داخل مخلوط سیمانی بود. آن ها مشاهده کردند که هنگام وقوع ترک، مواد معدنی هیدراته نشده از داخل کپسول های شیشه ای آزاد شده، در سطح ترک ظاهر می شوند و در فرآیند هیدراته شدن مجدد برای انجام عملیات خودترمیم شونده شرکت می کنند. به علاوه آزمایشات آن ها این نتیجه را حاصل کرد که استفاده از کپسول های شیشه ای و چیدمان آن ها به این طریق، مخلوط سیمانی را قادر می سازد تا ترک های عریض تری را نیز ترمیم کند. [۶]

از سویی دیگر Sherir و همکارانش در مقاله ای ظرفیت خودترمیم شونده مواد مرکب سیمانی که از خاکسترهای بادی نوع Mgo ساخته شده بودند را بررسی نمودند. آن ها ادعا داشتند استفاده از این ماده نه تنها سبب آب بند نمودن ترک ایجاد شده بر روی نمونه ها گردید، بلکه بهبود در دوام سازه را نیز سبب شد. [۷]

Hilloulina و همکارانش به طراحی کپسول های پلیمری و اندازه گیری مقاومت آن ها در برابر گرما و انجام آزمایش هایی پرداختند و با قرار دادن نمونه ای ساخته شده از این پلیمر ها تحت دستگاه اندازه گیری خمش سه نقطه ای این نتیجه را گرفتند که کپسول های پلیمری نسبت به کپسول های شیشه ای برتری بیشتری را دارند زیرا این کپسول ها در برابر روند اختلاط بتن مقاومت بیشتری از خود نشان می دهند و در عین حال تاثیر به سزایی در انجام عمل ترمیم و در کاهش پهنای ترک دارند. [۸]

از گذشته تا کنون کسی به مقایسه تاثیر طول لوله ی شیشه ای به کار رفته در داخل بتن های خودترمیم شونده نپرداخته است، لذا در این پژوهش این موضوع مهم مورد بررسی قرار می گیرد.

۳. روش تحقیق

برای بررسی تاثیر این روش در ترمیم تیرهای ترک خورده تحت پیچش اقدامات زیر صورت گرفت.

۱.۳. مصالح

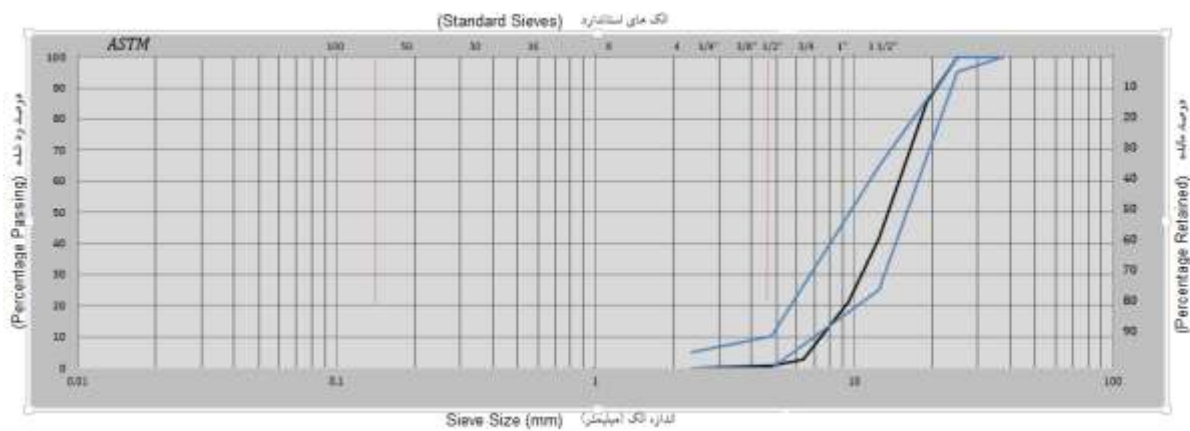
۱.۳.۱ بتن خودمتراکم

به منظور ساختن تیرهای بتن آرمه در این پژوهش برای ارضای این نوع روش خودترمیمی که در آن استفاده از کپسول های شیشه ای را الزام آور کرده بود و لذا از این رو استفاده از بتن معمولی و وایبره کردن آن برای ایجاد روانی و خروج حباب های احتمالی هوا از آن، سلامت شیشه ها در داخل بتن را تهدید می نمود، از بتن خودمتراکم با طرح اختلاط مطابق جدول ۱. استفاده شد تا شیشه ها از خطر شکستگی قبل از وقوع ترک در امان بمانند.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن خودمتراکم استفاده شده (kg/m^3)

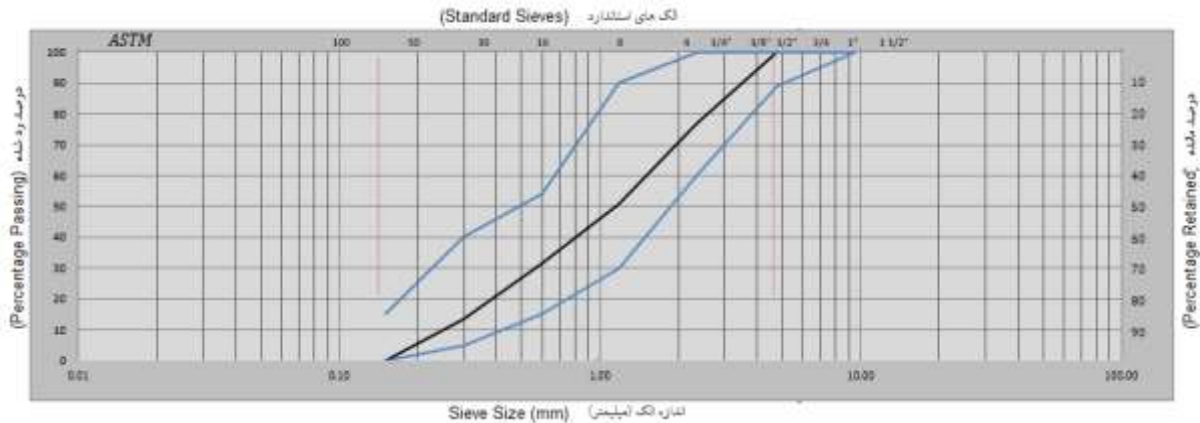
سیمان	۵۵۰
فوق روان کننده	۱۹.۵
شن	۵۵۰
پودر سنگ	۲۰۰
ماسه	۸۰۰
آب	۲۰۰

برای ساختن بتن خودمتراکم از مصالحی با دانه بندی شکل ۳ الف و ب. استفاده گردید.



الف) نمودار دانه بندی درشت دانه (شن)

شکل ۳- نمودار دانه بندی



(ب) نمودار دانه بندی ریزدانه (ماسه)

ادامه شکل ۳- نمودار دانه بندی

۲.۱.۳. آرماتورها و خاموتها

در تیرهای بتن آرمه، آرماتورهای طولی و عرضی وظیفه تحمل و کنترل پیچش را بر عهده دارند تا از ترک خوردگی بتن جلوگیری به عمل آید، لیکن تحمل این آرماتورها برای کنترل گسترش ترک در بتن تا حدی قابل ملاحظه است و از آن حد به بعد بتن هیچ گونه مقاومتی برای تحمل پیچش و ترک خوردگی ندارد. لذا به منظور شبیه سازی فضای آزمایشگاه و ساخت تیرها، به محیط واقعی و به منظور تشکیل ترک قبل از خرابی کامل سازه، همه تیرها به آرماتور مجهز گردیدند. (اگر در داخل بتن آرماتور وجود نداشته باشد به تیر بتنی امکان ایجاد ترک را نمی دهد و تیر به یکباره گسیخته و شکسته می شود و لذا ترمیم تیر معنایی نخواهد داشت).

در پروژه حاضر تیرهای بتنی ساخته شده به آرماتورهای طولی آج دار به قطر ۸ میلی متر و خاموت های عرضی ساده به قطر ۲/۵ میلی متر بر اساس محاسبات انجام شده، مسلح شده بودند.

۳.۱.۳. کپسول های شیشه ای

کپسول های شیشه ای به قطر خارجی ۸ میلی متر، به طول های ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متر به منظور انجام عملیات ترمیم با روش خودترمیمی با چسب محصور شده در لوله های شیشه ای بریده شدند.

۴.۱.۳. چسب پلی اورتان

برای انجام عمل خودترمیم شونده باید از چسبی استفاده می شد که علاوه بر دارا بودن چسبندگی مطلوب، دارای ویسکوزیته بسیار پایین باشد تا به محض شکستن لوله های شیشه ای از داخل آن خارج گردد. در نتیجه چسب پلی اورتان بدین منظور انتخاب گردید.

۲.۲.۳. روش و شیوه انجام آزمایش

۱.۲.۳. ساخت تیرهای بتن آرمه محتوی لوله های شیشه ای به طول صد سانتی متر حاوی پلی اورتان

تعداد ۴ عدد کپسول های شیشه ای به قطر خارجی ۸ میلی متر، به طول های ۱ متر بریده شدند و با بستن یک انتهایشان از چسب پلی اورتان پر شدند و پس از مسدود ساختن انتهایی دیگر در وجوه خارجی آرماتور ها، به چهار آرماتور موجود در تیر بتنی، از طریق بست متصل شدند (شکل ۴) این کار برای دو شبکه آرماتور انجام گرفته و سپس بتن ریزی صورت گرفت. و به مدت ۵۶ روز در داخل محلول آب-آهک برای رسیدن به مقاومت مطلوب قرار داده شد.



شکل ۴- اتصال کپسول های ۱ متری محتوی کموزیل به شبکه آرماتور

۲.۲.۳. ساخت تیرهای بتن آرمه محتوی لوله های شیشه ای به طول ده سانتی متر حاوی پلی اورتان

مراحل و روش های به کار برده شده برای روش خودترمیمی با لوله های شیشه ای صد سانتی متری محتوی چسب، برای لوله های ده سانتی متری شیشه ای محتوی چسب نیز انجام شد (شکل ۵). با این تفاوت که تعداد ۴۴ عدد لوله ای شیشه ای محتوی چسب پلی اورتان به این ترتیب که در هر وجه ۱۱ عدد کپسول توسط بست هایی به شبکه آرماتور اتصال داده شده بود استفاده شد و سپس بتن ریزی گردید. این کار برای یک شبکه آرماتور دیگر نیز صورت گرفت.



شکل ۵- اتصال کپسول های شیشه ای ده سانتی متری محتوی پلی اورتان به شبکه آرماتور

برای پر نمودن لوله های شیشه ای به طول های ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متری مطرح شده در بالا به این صورت عمل شده که ابتدا یک سر آن ها را با شلنگ های لاستیکی کوچک که از یک انتها هوا گیری و بسته شده اند، بسته شد و چسب کموزیل به داخل شیشه توسط سرنگ ۳۰۰ سی سی تزریق گردید. لازم به ذکر است که سعی شد شیشه کاملاً از چسب پرگردد تا هوایی داخل آن باقی نماند و موجب خشک شدن چسب نگردد. سپس انتهای دیگر مجدداً توسط همان شلنگ های کوچک بریده شده ای یک انتها بسته، پوشانده شد.

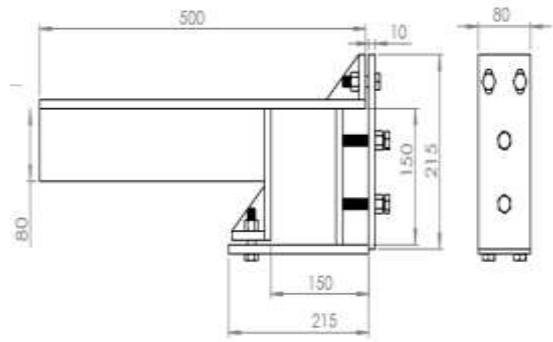
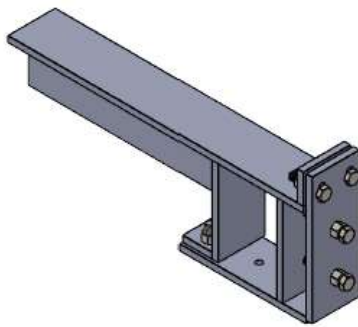
۳،۲،۳. دستگاه انتقال پیچش

برای اعمال بار پیچش دستگاهی طراحی و اختراع شد تا افزون بر انتقال پیچش به تیرهای بتنی خاصیت سهولت در اجرا و نحوه بستن و قابلیت انطباق با انواع سازه‌های بتنی را داشته باشد.

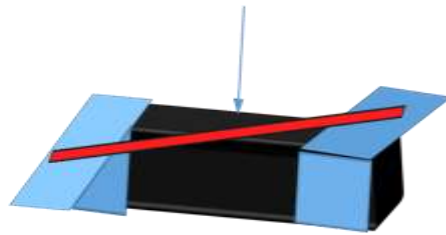
امکان بارگذاری ساده، انتقال دقیق نیرو و سرعت بالا در بستن قطعات از مزایای این دستگاه است. این دستگاه طوری طراحی شده تا با تیرهای بتنی با ابعاد مختلف سازگاری داشته باشد و امکان ساخت آن برای هر اندازه‌ای یا ارائه نقشه‌اش امکان پذیر باشد. از سویی دیگر استفاده همزمان آن از دستگاه خمش برای اعمال بارگذاری سبب کاهش هزینه‌ها می‌شود.

دستگاه از دو عدد قوطی با طول و عرض ۰،۱۵ متر و ارتفاع ۰،۸ متر وضخامت صفحه ۰،۰۱ متر تشکیل شده است، (شکل ۶) این قوطی‌ها توسط چهار عدد ورق فولادی که توسط جوش گوشه به هم متصل شده، ساخته شده و نورد شده نیستند. از انتهای این قوطی‌ها، دستک‌هایی فولادی به طول ۰،۳۵ متر قرار دارند. لازم به ذکر است که دو گوشه ی قوطی جوش داده شده و دو گوشه ی دیگر توسط پیچ‌هایی بر روی یکدیگر قرار گرفته اند. (این تعبیه به این منظور است که بتنی که داخل قوطی قرار می‌گیرد کاملاً محکم و چفت شود و امکان و احتمال حرکت بتن در داخل قالب از بین برود. پس از قرار دادن بتن به طور کامل در داخل قوطی (به این ترتیب که دستک‌ها در جهت مخالف یک دیگر در یک راستا قرار بگیرند) و سفت شدن پیچ‌های مذکور، یک تیر فولادی ۱ شکل به طول ۱،۴ متر بر روی این دستک‌ها قرار می‌گیرد (شکل ۷)، کلیه سیستم به دستگاه جک خمشی انتقال می‌یابد و با وارد آوردن بار به صورت متمرکز به قسمت وسط تیر ۱ شکل و انتقال عکس‌العملش به دستک‌ها، تیر مذکور تحت نیروی پیچشی قرار می‌گیرد و پیچیده می‌شود (شکل ۸) و تحت زاویه ۴۵ درجه می‌شکند. (شکل ۹). به علاوه داخل این قوطی‌ها، این قابلیت را دارد که با قرار دادن صفحه‌ای فلزی به همان ارتفاع ۰،۱۵ متر لیکن با ضخامت‌های متفاوت استفاده کرد تا از این طریق قادر بود که پیچش تیرها با ابعاد مختلف اندازه‌گیری گردد.

در نتیجه برای بارگذاری بدین صورت عمل می‌شود که ابتدا دو دستک در دو راس قطعه بتنی قرار می‌گیرند. دستک‌ها توسط چهار عدد پیچ فولادی تیر بتنی را مهار می‌کنند و با باز و بسته کردن پیچ‌ها می‌توان موقعیت بتن داخل دستک را تنظیم نمود. نکته مهم در استفاده از پیچ‌ها کنترل مقاومت برشی آن‌ها به منظور جلوگیری از گسیختگی آن‌ها حین محکم کردن می‌باشد. پس از قرار گرفتن تیر ۱ شکل بر روی دستک‌ها، اهرم عمودی جک انتقال خمش به مرکز IPE وارد می‌شود و با انتقال نیرو به دو انتهای دستک، تیر بتنی پیچیده می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که نیرو بایستی به منظور اعمال بار متقارن، به مرکز تیر IPE شکل وارد گردد.



شکل ۶- نمایی از دستک و ابعاد و اندازه آن‌ها



شکل ۷- شمایی کلی از نحوه اعمال پیچش

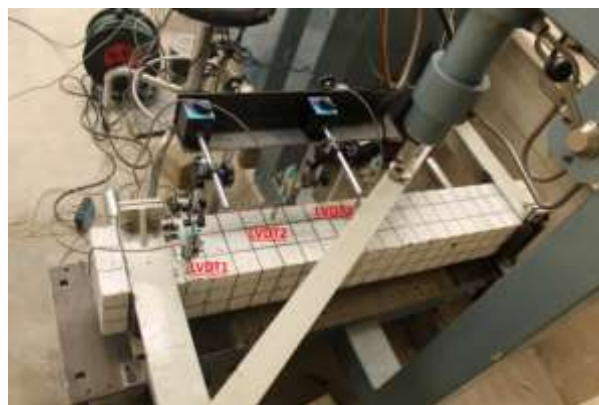


شکل ۸- سیستم آماده بارگذاری پیچشی



شکل ۹- تیر بتنی فاقد آرما تور، شکسته شده با زاویه ۴۵ درجه تحت بارگذاری پیچشی

از سویی دیگر به منظور اندازه گیری دقیق نیرو و نمایش آن به صورت نموداری، از یک عدد لود سل ۲,۵ تنی استفاده گردید. به علاوه به منظور اندازه گیری دقیق جابه جایی ها نیز از سه عدد LVDT با طول کورس ۰,۰۳ متر در سه نقطه از تیر یکی (LVDT^۱) در نزدیکی دستک که محل انتقال بار به تیر بتنی می باشد و دارای بیشترین تغییر مکان است، یکی (LVDT^۳) در وسط تیر لیکن در فاصله ای دور از تار خنثی و دیگری (LVDT^۲) در فاصله ی بین دو LVDT دیگر قرار گرفت. (شکل ۱۰) سپس دستگاه های فوق به یک دیتا لاگر متصل گردید و با شروع بارگذاری، داده ها برداشت شدند.



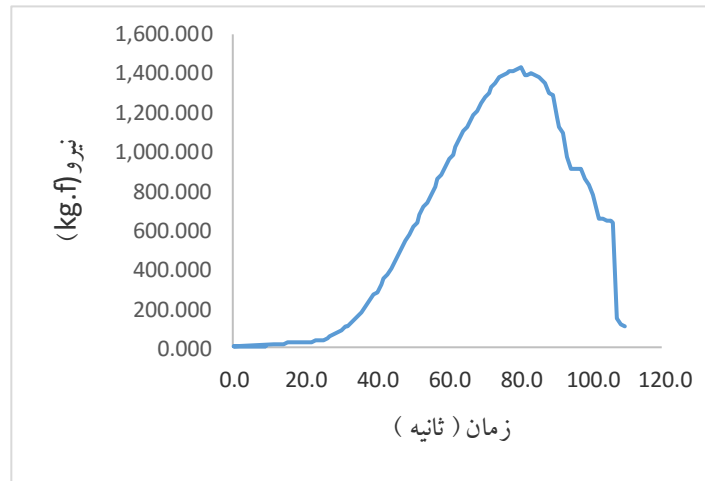
شکل ۱۰-نمایش محل قرار گیری LVDT ها و Load cell برای روی تیر بتنی

۳,۳. یافته ها

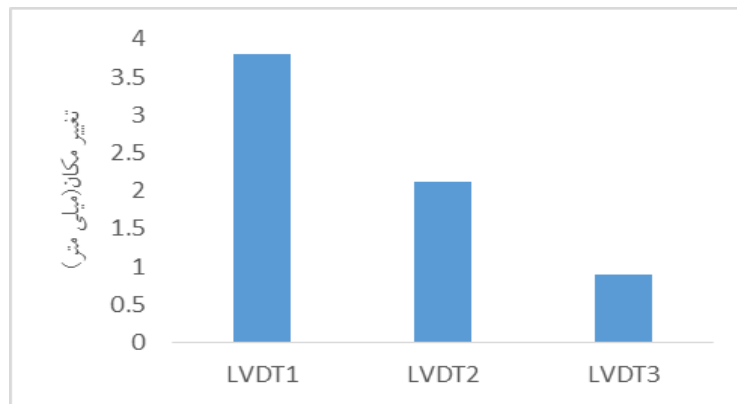
دو نمونه از تیرهای بتنی ساخته شده به عنوان نمونه های شاهد بودند تا از این طریق اطلاعات تجربی راجع به نحوه شکستن نمونه و مقاومت نهایی و محل ایجاد شکست و ترک به دست آورده شود. لذا با قرار دادن دو نمونه مذکور تحت بارگذاری پیچشی تا مرحله شکست کامل و با میانگین گیری بین دو نمونه شاهد، اطلاعات شکست نمونه به دست آورده شد.

نمودار (الف) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه شاهد تا مرحله رسیدن به ظرفیت پیچشی نهایی می باشد، همانگونه که از شکل پیداست، نمونه در نیرویی برابر با عدد ۱۴۳۰,۶۶ کیلوگرم شکسته شده است و به ماکسیمم ظرفیت پیچشی خود رسیده است. نمودار (ب) نیز نمودار تغییر مکان قرائت شده برای LVDT های قرار گرفته بر روی نمونه شاهد می باشد. با توجه به

این نمودار، نمونه شاهد در نزدیکی دستک ها که به علت انتقال عکس العمل نیروی پیچشی در آن محل دارای بیشترین تغییر مکان است، دارای تغییر مکانی برابر با ۳,۸ میلی متر (LVDT^۱) می باشد و در وسط تیر که به علت متقارن بودن نوع بارگذاری تغییر مکان کمتری را متحمل می شود دارای تغییر مکان ۰,۸۹۵ میلی متر (LVDT^۲) است و در فاصله ای بین این دو نیز تغییر مکانی برابر با ۲,۱۲ میلی متر (LVDT^۳) را دارد.



نمودار الف-نمودار نیرو بر حسب زمان برای نمونه شاهد



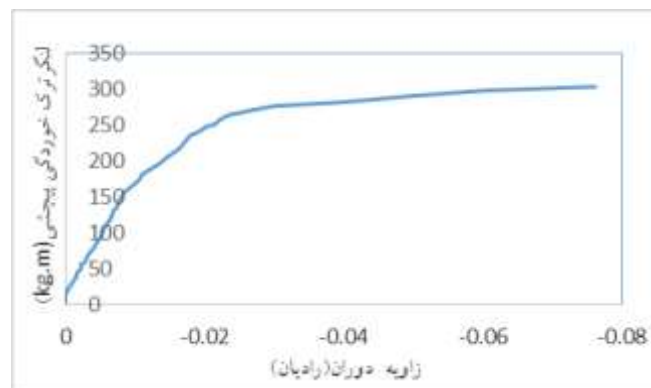
نمودار ب.۱-نمودار میله‌ای برای سه LVDT استفاده شده برای نمونه شاهد

پروژه‌ی حاضر بررسی عملکرد بتن تحت نیروی پیچشی بود، لذا بررسی و مقایسه نمودار لنگر بر حسب زاویه پیچشی می توانست اطلاعات دقیق تری راجع به نحوه شکست در اختیار گذارد و در نتیجه کار مقایسه با دقت بیشتری صورت گیرد.

به منظور کسب اطلاعات دقیق تر راجع به نیروی لازم برای ایجاد ترک به منظور ترمیم با روش های مختلف، محاسباتی بر اساس کتب مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان برای لنگر ترک خوردگی پیچشی انجام گرفت و به دنبال آن نمودار لنگر پیچشی بر حسب زاویه پیچش برای نمونه شاهد رسم شد. که در آن لنگر برابر طول بازوی اندازه گیری شده ضربدر نصف نیروی قرائت شده بود. طول بازوی اندازه گیری با توجه به شکل ۶. برابر ۰,۴۲۵ متر است (فاصله آکس مکعب مربع دستکی که دور تا دور بتن قرار می گرد تا محل اعمال نیرو) و زاویه قرائت شده برابر فاصله LVDT^۱ تا آکس نمونه بتنی که تار خنثی نمونه نیز می باشد، تقسیم بر عدد قرائت شده از LVDT شماره ۱.

۱.۳.۳. بارگذاری نمونه شاهد

برای نمونه شاهد آخرین عدد قرائت شده از نیرو به هنگام گسیختگی نمونه برابر با ۱۴۳۰٫۶۶ کیلوگرم بود. LVDT^۱ در این نیرو تغییر مکان ۳٫۸ میلی متر را نشان می‌داد. در نتیجه میزان زاویه پیچشی برای این نقطه برابر با ۰٫۰۷۶ رادیان، که از تقسیم این تغییر مکان بر فاصله LVDT^۱ از تار خنثی نمونه بتنی (۵۰ میلی متر) به دست می‌آید، با ضرب میزان نیرو قرائت شده (۱۴۳۰٫۶۶ کیلوگرم) در فاصله محل اعمال عکس العمل نیرو وارده بر روی یکی از دستک‌ها تا محل تار خنثی نمونه بتنی (۰٫۴۲۵ متر) لنگر ترک خوردگی پیچشی برابر با ۳۰۴٫۰۲ کیلوگرم متر به دست آمد. (نمودار ۲)



نمودار ۲- نمودار لنگر پیچشی بر حسب زاویه پیچشی برای نمونه شاهد.

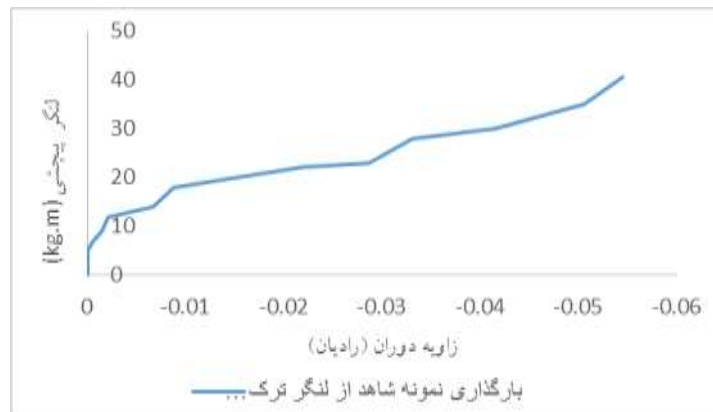
باتوجه به نمودار (۲) نمونه شاهد در لنگری برابر با ۳۰۴٫۰۲ کیلوگرم متر، به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود رسیده است که معادل با زاویه ۰٫۰۷۶ رادیان می‌باشد.

با محاسبه لنگر ترک خوردگی پیچشی اعضای بتنی به فرمول (۱) و با توجه به داده های لودسل و LVDT برای نمونه شاهد، لنگر ترک خوردگی در زاویه ۰٫۰۲۳ رادیان، اتفاق می‌افتد. این عدد معادل نیروی ۱۲۴۶٫۵ کیلوگرم می‌باشد. [۲]

$$T_{cr} = \frac{2Ac^2}{Vc * Pc} \quad (1)[2]$$

در فرمول ۱. Vc مقاومت برشی مقطع برحسب مگاپاسکال، Ac ، مساحت سطح مقطع بر حسب میلی متر مربع و Pc محیط سطح مقطع بر حسب میلی متر است.

در نتیجه دو نمونه دیگر تا میزان لنگر ترک خوردگی (۲۶۴٫۸۹ کیلوگرم متر) بارگذاری گردیدند و سپس مجدداً به منظور یافتن ظرفیت پیچشی نهایی باقی مانده در داخل آن مجدداً بارگذاری گشتند. پس از میانگیری بین دو نمونه، نمودار لنگر پیچشی بر حسب زاویه پیچش مطابق نمودار ۳. رسم گردید. همانطور که از نمودار پیداست، ظرفیت باقی مانده برابر ۴۰٫۳۹ کیلوگرم متر است.



نمودار ۳- بارگذاری نمونه شاهد از لنگر ترک خوردگی

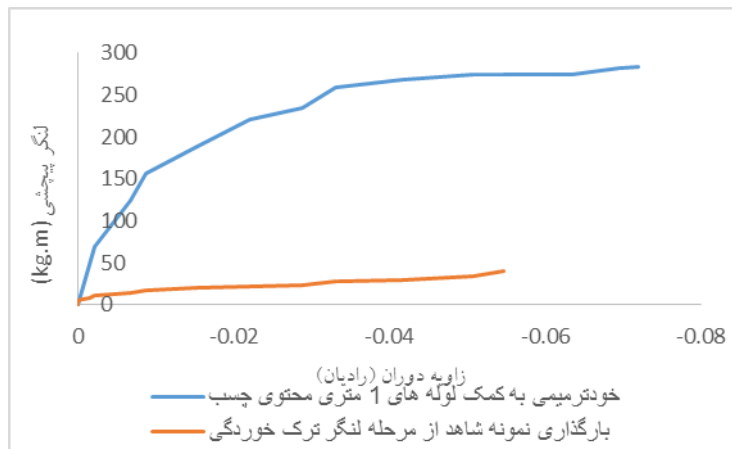
۲.۳.۳. بارگذاری نمونه ترمیم شده با لوله های شیشه ای ۱۰۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان

نمودار ۴. نمودار نیرو بر حسب زمان برای بارگذاری مجدد نمونه شاهد از مرحله لنگر ترک خوردگی (لنگر باقی مانده در بتن پس از بارگذاری تا مرحله لنگر ترک خوردگی) و نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی با لوله های یک متری است. مطابق شکل تیر با این روش ترمیم در ۱۷ امین ثانیه پس از شروع بارگذاری با بار ۱۳۳۰,۶۹ کیلوگرم به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود می رسد. از مقایسه این نمونه با نمونه شاهد بارگذاری شده از مرحله لنگر ترک خوردگی می توان نتیجه گرفت که روش فوق سبب افزایش مقاومت پیچشی سازه شده است و در مدت زمان کمتری نسبت به نمونه شاهد به حداکثر مقاومت خود رسیده است.



نمودار ۴- نمودار نیرو بر حسب زمان برای نمونه شاهد و نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی با لوله های یک

نمودار ۵. نمودار پیچشی بر حسب زاویه پیچش برای بارگذاری مجدد نمونه شاهد از مرحله لنگر ترک خوردگی (لنگر باقی مانده در بتن پس از بارگذاری تا مرحله لنگر ترک خوردگی) و نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی با لوله های یک متری است. مطابق نمودار، تیر یاد شده در لنگری برابر با ۲۸۲,۷۷ کیلوگرم در متر و با زاویه ۰,۰۷۲ رادیان به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود رسیده است.



نمودار ۵. نمودار لنگر پیچشی بر حسب زاویه پیچش برای نمونه شاهد و نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی با لوله‌های یک متری

نمودار تغییر مکان برای هر کدام از LVDT‌های قرار گرفته بر روی تیر ترمیم شده به روش خودترمیمی با لوله‌های یک متری مطابق نمودار ۶ است. با توجه به این نمودار تیر در نزدیکی محل دستک دارای بیشترین تغییر مکان به عدد ۳٫۶ میلی‌متر و در وسط دهانه دارای کمترین تغییر مکان به عدد ۰٫۷ میلی‌متر می‌باشد و در محلی ما بین این دو محل دارای تغییر مکانی به عدد ۱٫۹۱۷ میلی‌متر می‌باشد.



نمودار ۶. نمودار تغییر مکان LVDT های استفاده شده برای نمونه ترمیم شده با روش لوله‌های یک متری

نکته قابل توجه در این روش، واژگونی و ترک خوردن بتن، ناشی از بارگذاری ثانویه، در محلی به غیر از محل ترک خوردگی اولیه بود (شکل ۱۱). از سویی دیگر با کندن قطعی از بتن مشاهده شد که چسب کاملاً در محل ترک سفت شده و آن را پر نموده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۱. نمونه ترمیم شده به روش خودترمیمی تحت بارگذاری ثانویه و ترک خوردن در محلی غیر محل ترک اولیه



شکل ۱۲. شکست نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی با لوله های یک متری و مشاهده سفت شدن چسب و پر کردن ترکها در داخل بتن و در نتیجه انجام عمل ترمیم

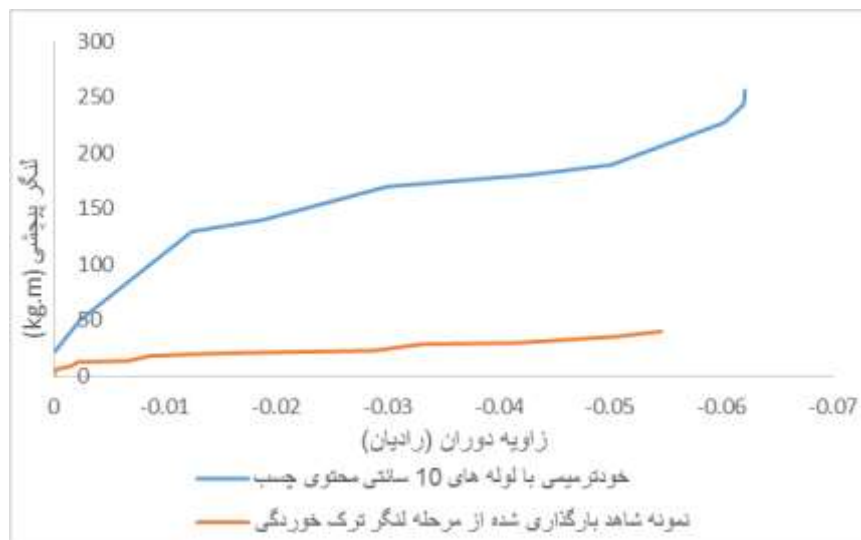
۳,۳,۳ بارگذاری نمونه ترمیم شده با لوله های شیشه ای ۱۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان

مطابق نمودار ۷. تیر با این روش ترمیم در ۱۱,۱ امین ثانیه پس از شروع بارگذاری با بار ۱۲۰۳,۶۸ کیلوگرم به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود می رسد. از مقایسه این نمونه با منحنی بارگذاری مجدد نمونه شاهد از مرحله لنگر ترک خوردگی (لنگر باقی مانده در بتن پس از بارگذاری تا مرحله لنگر ترک خوردگی) می توان نتیجه گرفت که روش فوق سبب افزایش مقاومت پیچشی سازه نسبت به نمونه شاهد بارگذاری شده از مرحله لنگر ترک خوردگی شده است و در مدت زمان کمتری نسبت به نمونه شاهد به حداکثر مقاومت پیچشی خود رسیده است.



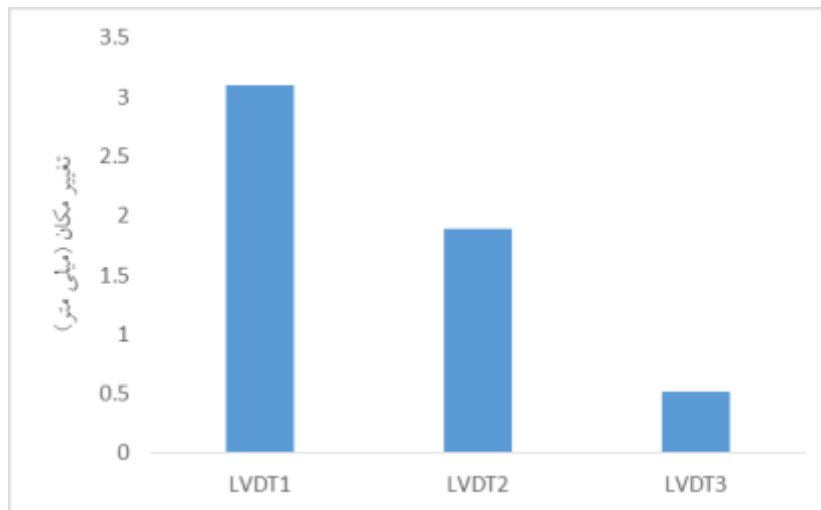
نمودار ۷. نمودار نیرو بر حسب زمان برای نمونه شاهد و نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی با لوله های ده سانتی متری

مطابق نمودار (۸)، تیر یاد شده در لنگری برابر با ۲۵۵،۷۸ کیلوگرم در متر و با زاویه ۰،۰۶۲ رادیان به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود رسیده است.



نمودار ۸. نمودار لنگر پیچشی بر حسب زاویه دوران، برای نمونه شاهد و نمونه ترمیم شده با روش خودترمیمی به کمک لوله های ۱۰ سانتی متری محتوی چسب

نمودار تغییر مکان برای هر کدام از LVDT های قرار گرفته بر روی تیر ترمیم شده به روش خودترمیمی با لوله های ده سانتی متری مطابق نمودار (۹) می باشد. با توجه به این نمودار تیر در نزدیکی محل دستک دارای بیشترین تغییر مکان به عدد ۳،۱۰۴ میلی متر و در وسط دهانه دارای کمترین تغییر مکان به عدد ۰،۵۲ میلی متر و در محلی ما بین این دو محل دارای تغییر مکانی به عدد ۱،۸۸ میلی متر می باشد.



نمودار ۹. نمودار تغییر مکان LVDT های استفاده شده برای نمونه ترمیم شده با لوله‌های ۱۰ سانتی متری

در این روش پس از باگذاری اولیه به منظور ایجاد ترک، در برخی نواحی چسبی از داخل بتن خارج نگردید، لذا این اطمینان حاصل نشد که قطعا تیرها ترمیم گردیده است. پس از شکست ثانویه و برداشت یک قطعه از بتن تخریب شده، مشاهده شد که ترک در بعضی نقاط از روی شیشه عبور نموده و در نتیجه شیشه نشکسته و چسب نیز خارج نشده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. عبور ترک از روی انتهای لوله ۱۰ سانتی متری و عدم شکست لوله در یک ناحیه پس از بارگذاری ثانویه

در نتیجه استفاده از روش‌های خودترمیمی‌ای همچون استفاده از لوله‌های شیشه‌ای محتوی پلی‌اورتان در داخل بتن می‌تواند افزایش چشمگیری در افزایش ظرفیت بتن ترک خورده را حادث کند، لیکن استفاده از کپسول‌های شیشه‌ای یک متری به علت منفصل نبود شیشه‌هایی که در یک راستا قرار گرفته سبب خروج کامل چسب از داخل شیشه شده و ترک را بهتر پر میکند و در نتیجه مقاومت بتن ترک خورده را بیشتر افزایش می‌دهد.

۴. نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی رفتاری تیرهای بتنی خودترمیم شونده به روش استفاده از لوله‌های شیشه‌ای ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متری حاوی چسب پلی اورتان و مقایسه این دو روش بایکدیگر تحت بارگذاری پیچشی انجام شد، نتایج نشان داد:

۱. روش خودترمیمی به کمک چسب پلی اورتان به صورت محصورشده در لوله‌های شیشه‌ای روش مناسب برای ترمیم تیرهای ترک خورده بتنی تحت بارگذاری پیچشی می‌باشد.
 ۲. نمونه شاهد در لنگر ۳۰۴،۰۲ کیلوگرم متر، زاویه ۰،۳۷ رادیان به حداکثر میزان مقاومت خود رسید. نمونه های شاهد بارگذاری شده تا مرحله لنگر نهایی ظرفیت پیچشی، شاهد بارگذاری شده از مرحله لنگر ترک خوردگی، تیر ترمیم شده به روش خودترمیمی با لوله‌های شیشه‌ای ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان در لنگرهایی به ترتیب ۳۰۴،۰۲، ۲۸۲،۷۷، ۴۰،۳۹، ۲۵۵،۷۸، ۰،۷۲، ۰،۰۶، ۰،۰۵، ۰،۰۷۶ رادیان بود به حداکثر ظرفیت پیچشی خود رسیدند. همانطور که مشخص است تیر ترمیم شده به روش خودترمیمی به کمک لوله‌های یک متری تاثیر بیشتری بر افزایش مقاومت پیچشی سازه داشته است.
 ۳. ظرفیت پیچشی نمونه شاهد بارگذاری شده تا مرحله لنگر نهایی، شاهد بارگذاری شده از مرحله لنگر ترک خوردگی، نمونه‌های ترمیم شده به روش خودترمیمی با استفاده از لوله‌های شیشه ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متری به ترتیب ۱۳۳۰،۶۹، ۱۲۰۳،۶۸، ۱۹۰،۰۷، ۱۴۳۰،۶۶ کیلوگرم بود.
 ۴. جابه‌جایی LVDT های ۳ و ۲،۱ به ترتیب برای نمونه شاهد بارگذاری شده تا مرحله لنگر نهایی برابر ۳،۸، ۲،۱۲ و ۰،۸۹۵، نمونه شاهد بارگذاری شده از مرحله لنگر ترک خوردگی برابر ۰،۷۰۳، ۵۱۹،۰،۰۵، ۰،۵۱۹، ۰،۷۰۳ و ۰،۵۱۹، ۰،۰۵، ۰،۵۱۹، ۰،۷۰۳ با لوله‌های شیشه‌ای ۱۰۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان ۳،۶، ۱،۹ و ۰،۶۲ و نمونه خودترمیمی با لوله‌های شیشه‌ای ۱۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان برابر ۳،۱۰، ۱،۸۸، ۰،۵۲ میلی متر بود.
- روش خودترمیمی با لوله‌های شیشه‌ای ۱۰۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان به علت قابلیت شکست شیشه و خروج چسب از داخل آن و پرکردن ترک در هر مرحله از مزیت بیشتری نسبت به روش خودترمیمی با لوله‌های شیشه‌ای ۱۰ سانتی متری محتوی پلی اورتان برخوردار است و می تواند ظرفیت پیچشی بتن ترمیم شده را نسبت به نمونه شاهد بارگذاری شده از مرحله لنگر ترک خوردگی تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

۵. مراجع

- [۱] بختیاری، فرید. ۱۳۷۸. "بررسی سختی پیچشی اعضای بتن مسلح پس از ترک خوردگی".
- [۲] مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان. "طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه". ویرایش ۱۳۹۲.
- [۳] مرشد، ر. و م. س. زارعیان. ۱۳۹۰. "بتن خود ترمیم شونده". سومین کنفرانس بتن ایران. تهران

[۴] Van Tittelboom, K., Wang, J., Araújo, M., Snoeck, D., Gruyaert, E., Debbaut, B., Derluyn, H., Cnudde, V., Tsangouri, E., Van Hemelrijck, D. and De Belie, N., ۲۰۱۶. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. Construction and building materials, ۱۰۷, pp.۱۳۷-۱۲۵.

[۵]. Roig-Flores, M., Pirritano, F., Serna, P. and Ferrara, L., ۲۰۱۶. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials*, ۱۱۴, pp. ۴۴۷-۴۵۷.

[۶]. Qureshi, T.S., Kanellopoulos, A. and Al-Tabbaa, A., ۲۰۱۶. Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, ۱۲۱, pp. ۶۲۹-۶۴۳.

[۷]. Sherir, M.A., Hossain, K.M. and Lachemi, M., ۲۰۱۶. Self-healing and expansion characteristics of cementitious composites with high volume fly ash and MgO-type expansive agent. *Construction and Building Materials*, ۱۲۷, pp. ۸۰-۹۲.

[۸]. Hilloulin, B., Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., De Belie, N. and Loukili, A., ۲۰۱۵. Design of polymeric capsules for self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, ۵۵, pp. ۲۹۸-۳۰۷.

[۹]. کلینیک بتن ایران. ۱۳۹۴. "ترک سازه‌ای، معیاب و روش ترمیم بتن."

<http://clinicbeton.ir/%D%A%A%D%AA%D%86/%D%85%D%82%D%A%D%84%D%A%D%AA-%D%B%D%84%D%85/DB/AC-%D%A%D%AA%D%86%D%AA%D%B1/DA%A-%D%B%D%A%D%B%D%87-%D%A/DB/AC-%D%85%D%B%D%A/DB/AC%D%A-%D%88-%D%B%D%88/D%B-%D%AA%D%B1/D%85/>

[۱۰]. ویکی پدیا. بدون تاریخ. "پیچش." (۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷)

<https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%BE%DB/AC%DA/86/D8/B4>