بررسی استفاده از باکتری باسیلوس ساب تیلیس در ترمیم بتن‌های خودترمیم شونده

Investigating the use of Bacillus subtilis bacteria in the repair of self-healing concrete

محدثه انبارلوئی*
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مهدی مهدی‌خانی
استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

Mohadeseh Anbarlouie *
Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
Mahdi Mahdikhani
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

*Corresponding author's email address:
mohadeseh.anbarlouie@edu.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲

چکیده

ترک‌های کوچک در بتن ممکن است با گذر زمان تبدیل به ترک‌های بزرگ شده و منجر به کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی گردند. بنابراین باید سرعت رشد و گسترش ترک‌ها را محدود کرد. ترمیم ترک در بتن یکی از راه‌های موثر برای جلوگیری از گسترش ترک‌ها می‌باشد به همین دلیل از گذشته تا کنون روش‌های مختلفی برای ترمیم ترک‌های ایجاد شده بر روی بتن در اث عوامل مختلف بررسی ومقایسه شده‌اند. این پژوهش یک روش بیولوژیکی برای بهبود اثر خودترمیم شوندگی تیرهای بتنی توسط فعالیت میکروبی باکتری باسیلوس ساب تیلیس را ارائه می‌دهد. در این پژوهش خودترمیمی شوندگی با تزریق باکتری باسیلوس توسط سرنگ انسولین به داخل ترک آغاز می‌گردد. به همین منظور ۶عدد تیر بتنی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۲۰ سانتی متر ساخته شدند و خاصیت خودترمیم شوندگی با ایجاد ترک از طریق اعمال بار استاتیکی پیچشی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.در پایان با توجه به لنگر پیچشی نهایی تیرها این نتیجه گرفته شد که تیر ترمیم شده با این روش ظرفیت پیچشی نمونه شاهد اولیه را ۹۳،۱۳ درصد افزایش داده و ظرفیت پیچشی تیر ترک خورده را نیز ۷،۶ برابر کرده است.

کلمات کلیدی
باکتری باسیلوس ساب تیلیس، خودترمیم شوندگی، بتن، پیچش

Abstract

Small cracks in concrete may turn into large cracks over time and lead to a reduction in the useful life of concrete structures. Therefore, the speed of growth and expansion of cracks should be limited. Repairing cracks in concrete is one of the effective ways to prevent the spread of cracks, for this reason, various methods for repairing cracks created on concrete due to various factors have been investigated and compared. This research presents a biological method to improve the self-healing effect of concrete beams by the microbial activity of Bacillus subtilis bacteria. In this research, self-healing begins with the injection of Bacillus bacteria into the crack through an insulin syringe. For this purpose, 6 concrete beams with dimensions of 15x15x120 cm were made and the property of self-healing by creating a crack was investigated and evaluated by applying static torsional load. The beam repaired with this method has increased the torsional capacity of the original sample by 93.13% and the torsional capacity of the cracked beam has also increased by 7.6 times.

Keywords
Bacillus subtilis bacteria, self-healing, concrete, twisting

۱- مقدمه

بتن در حالت عادی از خاصیتی طبیعی برخوردار است تا به‌اندازه‌ای خود را ترمیم کند. به این صورت که اگر آب وارد یک ترک شود و با ذرات غیرهیدراته سیمان تماس داشته باشد، این ذرات هیدراته شده و باعث بسته شدن شکاف ترک می‌شوند. اگر هم آب و هم کربن دی‌اکسید وارد ترک‌ها شود، پر شدن ترک‌ها از طریق ته‌نشینی ذرات کلسیم کربنات ایجادشده ازکلسیم هیدروکسید نشت کرده، امکان‌پذیر است. اما ازآنجایی‌که فرآیند خودترمیمی طبیعی، محدود به ترک‌های کوچک است، لذا تلاش‌های بسیاری انجام شده است که خاصیت خودترمیمی بهبود یافته، خودکاری و کارایی بالایی داشته باشد. به‌منظور انجام عمل خودترمیمی نیز روش‌های متعددی ازجمله استفاده از کپسول‌های شیشه‌ای، پلیمرهای سوپر جاذب آب، استفاده از باکتری‌ها و غیره وجود دارد. روش خودترمیمی با اضافه کردن باکتری نیز یکی از روش‌های ترمیم ترک در سازه‌های بتنی است. در این روش از باکتری‌های خاصی که مقاومت زیادی در محیط های قلیایی دارند استفاده می‌شوند که معمولا این باکتری‌ها در طبیعت یافت می‌شوند.

این باکتری ها تا زمان شکل گیری ترک در بتن در حالت کمون (به اصطلاح در حالت خواب) باقی می‌مانند و پس از ایجاد ترک است که فعال شده و به کار می‌افتند. زمانی که آن‌ها شروع به فعالیت می‌کنند آب را مصرف نموده به مقدار زیادی رسوب کلسیم کربنات تولید می‌کنند، این کربنات کلسیم تولید شده نتیجه متابولسیم باکتریایی در یک محیط کلسیمی قوی می‌باشد. در واقع

در این روش باکتری های استفاده شده در بتن آن را به یک موجود جاندار و زنده تبدیل می‌کند که قادر خواهد شد ترک های خود را ترمیم کند. این بتن خودترمیم ترکیبی از باکتری داخل بتن و شیره کلسیمی به عنوان منبع تغذیه باکتری ها، زمانی که فعال می‌شوند، می‌باشد. این باکتری ها پس از اینکه فعال شدند، از این منبع غذایی (شیره کلسیمی) در محیط تغذیه کرده و سبب پر شدن ترک ها می‌گردند [۱].

از سویی دیگر عوامل مختلف در ایجاد ترک در بتن نقش دارند که از جمله آن عوامل می‌توان به ترک‌هایی که در اثر نیروهای کششی، خمشی و برشی که در بتن به وجود می‌آیند و با ترک‌هایی که ناشی از خوردگی آرماتور یا جمع‌شدگی در دال طره‌ای به وجود می‌آیند، اشاره نمود. همان‌طور که مطرح شد عامل پیچش در بتن و سازه‌های بتنی سبب ایجاد ترک در بتن می‌گردد. پیچش در سازه‌های بتن مسلح معمولا در اثر یکپارچگی و پیوستگی اعضا به وجود می‌آید. بنابراین در در تیرهای لبه و تیرهایی که ازیک طرف متصل به تیر یا دال می‌باشند دارای اهمیت ویژه‌ای هستند.

در این پژوهش با ساخت تیرهای بتنی و بارگذاری آن‌ها تحت نیروی پیچشی اقدام به ترمیم آن‌ها با استفاده از تزریق باکتری به داخل ترک و بررسی اثر خودترمیم شوندگی با استفاده از این روش شده است.

۲- مبانی تحقیق

از جمله پژوهش‌هایی که در زمینه ترمیم بتن توسط باکتری‌های مختلف صورت گرفته است را می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

Huaicheng Chen و همکارانش به تحقیق و پژوهش بر روی مواد سیمانی خودترمیم شونده با استفاده از باکتری ها و مواد مغذی بی‌حرکت پرداختند، آن ها نتیجه گرفتند که استفاده از باکتری ها، عاملی موثر در ترمیم ترک مواد سیمانی است. مطالعات و تحقیقات آن ها در زمینه ضریب نفوذ پذیری آب و استحکام خمشی نمونه های ترمیم یافته نشان داد که این روش بیولوژیکی سرعت ترمیم ترک و افزایش عمق ترک ها را بهبود می بخشد [۲].

Luo و همکارانش تاثیر باکتری ها را به عنوان ماده ترمیمی بر روی خواص رئولوژی، سینتیک هیدراتاسیون و مقاومت فشاری مواد سیمانی بررسی کردند آن ها در تحقیقشان از سه نوع باکتری RB (که در آن R نشانگرکلسیم لاکتات و B نشانگر پودر باکتری اسپور) ، (JB که در آنJ نشان دهنده استفاده از فرمت کلسیم و B نشانگر پودر باکتری اسپور) و در نهایت NB (که در آن N نشان دهنده نیترات کلسیم و B نشان دهنده پودر باکتری اسپور) بود، استفاده کردند. بر اساس تحقیقات آن ها رئولوژی مواد سیمانی با استفاده از باکتری ها به عنوان ماده ترمیمی افزایش پیدا کرد و هر کدام از این نوع باکتری ها بر روانی ملات سیمان تاثیر گذاشتند . به علاوه افزودن این باکتری ها به عنوان عامل ترمیمی در مواد سیمانی، هیدراسیون سیمان را تا حد قابل ملاحظه ای تحت تاثیر قرار داد [۳].

Qian و همکارانش نیز طی مقاله ای نشان دادند که اگرچه ظرفیت خود ترمیم شوندگی ترک به عوامل متعددی بستگی دارد لیکن به طورکلی خودترمیمی میکروبی عاملی موثر در ترمیم ترک‌های ایجاد شده بر روی بتن است. طی تحقیقات آن ها افزایش سایز ترک، ترمیم و تعمیر آن را سخت تر می‌کرد، لذا استفاده از عامل میکروبی در خودترمیمی را به عمق ترک ۰,۸ میلی متری محدود ساختند. در تحقیقات آن ها عمل آوری با آب بهترین روش برای بتن خودترمیم شونده توسط باکتری بود. به علاوه در تحقیق آن ها پارامتر نسبت ترمیمی ترک با افزایش سن ترک، کاهش یافت [۴].

Wang و همکارانش مقاله ای ارائه کردند که در آن باکتری اسپور ابتدا در هیدروژل کپسوله شده و سپس در داخل نمونه بتنی به منظور انجام عمل خودترمیمی گنجانده شده بود. آن ها نمونه هایی از ملات سیمان با استفاده از سیمان پرتلند معمولی ساختند که در آن نسبت شن به سیمان ۳ و نسبت آب به سیمان۰/۵ بود. استفاده از باکتری به این روش برتری متمایزی نسبت به سایر روش ها داشت، زیرا در این حالت حداکثر عرض ترمیم ترک حدود ۰/۵ میلی متر بود و نفوذ آب تا میزان ۶۸٪ کاهش پیدا کرد [۵].

Jing Xu و همکارش نیز در زمینه تاثیر باکتری بر انجام عمل خودترمیم شوندگی به تحقیق و پژوهش پرداخته ومقاله ای را ارائه نمودند. آن ها استفاده از باکتری را روشی موثر در ترمیم بتن در آینده نیز اعلام نمودند [۶].

Sarah L. William و همکارانش تاثیر باکتری (چه از نوع با دوام و چه از نوع بی دوام) بر انجام عمل خودترمیمی را مطرح کردند و استفاده از آن ها را در بهبود عملیات ترمیم موثر دانستند [۷].

Virginie Wiktor و همکارش نشان دادند که اعمال دو مولفه ای شیمیایی- زیستی عامل خودترمیمی متشکل از مخلوط اسپور باکتریایی و لاکتات کلسیم می‌تواند بر روی بالا بردن ظرفیت خود ترمیم شوندگی بسیار موثر باشد. به علاوه اندازه‌گیری اکسیژن نشان داده است که ترکیب بتن با اسپور باکتری گنجانده شده در ذرات رس منبسط شده، سبب می شود باکتری های فعال، زنده باقی بمانند و چند ماه پس از ریختن بتن داخل قالب نیز به فعالیت خود ادامه دهند [۸].

Jonkers و همکارانش نیز در یافتند که استفاده از سنگ سیمانی که در داخل آن باکتری اسپور گنجانده شده است پس از نفوذ آب به داخل ترک قادر به تبدیل همزمان لاکتات کلسیم به کلسیم کربنات معدنی می‌باشد [۹]. بنابراین با توجه به تحقیقات انجام شده تاثیر باکتری باسیلوس ساب‌تیلیس در ترمیم ترک تحت پیچش انجام نشده است لذا این موضوع در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

به منظور بررسی اثر استفاده از باکتری باسیلوس ساب تیلیس در ترمیم بتن ابتدا شش عدد تیر بتن آرمه با آراماتورهایی به قطر ۸ میلی‌متر و خاموت‌هایی به قطر ۲,۵ میلی‌متر ساخته شد. لازم به ذکر است که در ساخت تیرها به منظور سهولت در اجرا و افزایش مقاومت بیشتر از بتن خودمتراکم از طرح اختلاطی مطابق جدول ۱. استفاده شده بود.

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
4 (3), 2019
دوره ۴، شماره ۳
پاییز ۱۳۹۸
فصلنامه پژوهشی

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

پس از ساخت تیرها آن‌ها در داخل محلول آب-آهک قرار داده شد تا به مقاومت ۵۶ روزه برسند. برای پرورش و تکثیر باکتری‌ها ابتدا مواد لازم برای ساخت محیط کشت آن ها وزن شد (شکل۱) مواد تشکیل دهنده محیط کشت به شرح جدول ۲. بود.

جدول۲-مصالح به کار رفته برای ساخت محل کشت باکتری‌ها

Tryptone(Kg)	۰,۰۰۵
NaCl(Kg)	۰,۰۰۵
Yeast extract(Kg)	۰,۰۰۲۵
Water(cc)	۵۰۰

شکل ۱.اندازه گیری مواد لازم جهت آماده سازی محیط کشت باکتری

سپس داخل مصالح وزن شده، آب مقطر ریخته شد وکاملا با درپوش های آلومینیومی محفوظ گردید تا آلودگی و باکتری‌های دیگر وارد محیط کشت نشود (شکل۲).

شکل ۲ آماده سازی محیط کشت باکتری

در مرحله بعد محیط کشت به مدت ۳۰ دقیقه داخل اتوکلاو قرار گرفت تا کاملا استرلیزه گردد و از آلودگی ها پاک گردد (شکل ۳).

شکل ۳ قرار دادن محیط کشت در اتوکلاو به منظور از بین رفتن میکرب‌های احتمالی

سپس پس از خارج نمودن بشر محتوی محیط کشت باکتری ها از داخل اتوکلاو، باکتری از فریزر خارج شد و در داخل محیط کشت تزریق گردید(شکل۴).

شکل ۴ تزریق باکتری به محیط کشت

سپس بشر محتوی محیط کشت و باکتری به مدت ۲ شبانه روز داخل لرزاننده قرار گرفت (شکل ۵) تا به غلظت دلخواه برسند

شکل ۵ قرار دادن باکتری همراه با محیط کشت در داخل لرزاننده به منظور تکثیر و رشد

پس از گذشت دوشبانه روز از قرارگرفتن بشر محتوی باکتری و محیط کشتش در لرزاننده، با اندازه گیری OD و رسیدن به عدد ۰,۲۱۳ (شکل۶) باکتری آماده تزریق به داخل ترک گردید شد (شکل۷) .

شکل ۶ اندازه گیری OD باکتری‌ها

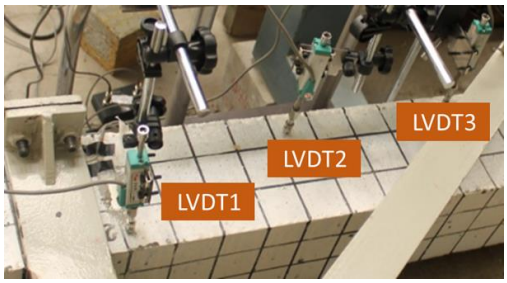
JECM
Journal of Engineering & Construction Management
4 (3), 2019
دوره ۴، شماره ۳
پاییز ۱۳۹۸
فصلنامه پژوهشی

شکل ۷ باکتری آماده شده برای انجام ترمیم بتن به روش تزریق باکتری

پس از کشت باکتری به منظور ایجاد ترک پیچشی بر روی تیرها از دستگاهی که به شرح زیر اختراع شده بود استفاده گردید:
دستگاه از دو عدد قوطی با طول و عرض ۰,۱۵ مترو ارتفاع۰,۸ متروضخامت صفحه ۰,۰۱ متر تشکیل شده است، این قوطی‌ها توسط چهارعدد ورق فولادی که توسط جوش گوشه به هم متصل شده، ساخته شده و نورد شده نیستند. از انتهای این قوطی‌ها، دستک هایی 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 پیچ هایی بر روی یکدیگر قرار گرفته اند. (این تعبیه به این منظوراست که بتنی که داخل قوطی قرار می‌گیرد کاملا 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 دستک ها در جهت مخالف یک دیگر در یک راستا قرار بگیرند) و سفت شدن پیچ های مذکور، یک تیر فولادی I شکل به طول ۱,۴ متر بر روی این دستک ها قرار می گیرد ،کلیه سیستم به دستگاه جک خمش انتقال می یابد و با وارد آوردن بار به صورت متمرکز به قسمت وسط تیر I شکل و انتقال عکس العملش به دستک‌ها، تیر مذکور تحت نیروی پیچشی قرار می‌گیرد و پیچیده می‌شود و تحت زاویه ۴۵ درجه می شکند. به علاوه داخل این قوطی‌ها، این قابلیت را دارد که با قرار دادن صفحه ای فلزی به همان ارتفاع ۰,۱۵ متر لیکن با ضخامت های متفاوت استفاده کرد تا از این طریق قادر بودکه پیچش تیرها با ابعاد مختلف، اندازه‌گیری گردد.
در نتیجه برای بارگذاری بدین صورت عمل می شود 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 وبسته 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 I شکل بر روی دستک‌ها، اهرم عمودی جک انتقال خمش به مرکز IPE وارد می‌شود و با انقال 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.شکل۸.شمایی از تیر بارگذاری شده با استفاده از این روش است.

شکل۸ شمایی از سیستم اختراع شده به منظور اعمال نیروی پیچشی

از سویی دیگر برای به دست آوردن تغییر مکان تیر در اثر پیچش و همچنین به دست آوردن زاویه پیچشی دوران از سه عدد LVDT در سه نقطه از تیر یکی(LVDT1) در نزدیکی دستک که محل انتقال بار به تیر بتنی می‌باشد و دارای بیشترین تغییر مکان است، یکی(LVDT3) در وسط تیر لیکن در فاصله ای دور از تار خنثی و دیگری (LVDT2) در فاصله‌ی بین دو LVDT دیگر ، استفاده گردید.(شکل۹)



شکل۹- LVDT های استفاده شده در پژوهش

در نتیجه با استفاده از دستگاه پیچشی اختراع شده اقدام به بارگذاری تیرها به این روش شد به این ترتیب که دوعدد از تیرها به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده بود و تا مرحله رسیدن به حداکثر ظرفیت پیچشی بارگذاری شدند تا از این طریق ظرفیت پیچشی تیر بتنی ساخته شده به دست آید و ۴ عدد دیگر تا رسیدن به مرحله لنگر ترک خوردگی پیچشی که از طریق محاسبات انجام شده در مبحث۹ مقررات ملی ساختمان به دست آورده شده بود بارگذاری گردیدند. دو عدد از آن چهار تیر بارگذاری شده تا مرحله رسیدن به لنگر ترک خوردگی بارگذاری شده بودند توسط تزریق باکتری از طریق سرنگ انسولین ترمیم گشتند.(شکل۱۰)

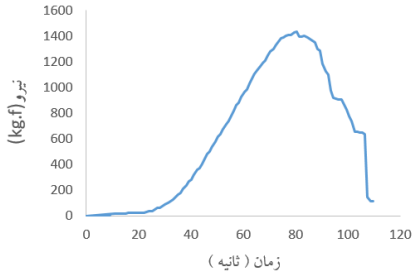
JECM
Journal of Engineering & Construction Management
4 (3), 2019
دوره ۴، شماره ۳
پاییز ۱۳۹۸
فصلنامه پژوهشی

شکل۱۰- تزریق باکتری به داخل ترک از طریق سرنگ انسولین

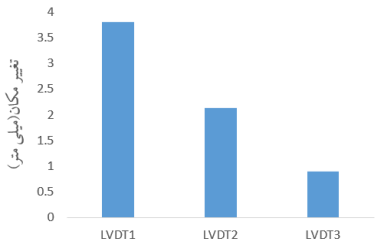
یافته‌ها

همانطور که ذکر گردید دو نمونه تیر بتنی ساخته شده به عنوان نمونه های شاهد بودند که برای به دست آوردن اطلاعات تجربی راجع به نحوه شکستن نمونه و مقاومت نهایی و محل ایجاد شکست و ترک بارگذاری شدند. 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 (۱.الف) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه شاهد تا مرحله شکست نهایی ورسیدن به ظرفیت پیچشی نهایی می‌باشد، همانگونه که از شکل پیداست، نمونه درنیرویی برابر با عدد ۱۴۳۰,۶۶کیلوگرم شکسته شده است و به ماکسیمم ظرفیت پیچشی خود رسیده است.نمودار(۱.ب) نیز نمودار تغییر مکان قرائت شده برای LVDTهای 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 ۳,۸میلی متر(LVDT1) می‌باشد و در وسط تیر که به علت متقارن بودن نوع بارگذاری تغییر مکان کمتری را متحمل می‌شود دارای تغییر مکان ۰,۸۹۵ میلی متر(LVDT3) است و در فاصله‌ای بین این دو نیز تغییر مکانی برابر با 2.12 میلی متر(LVDT2) را دارد.



نمودار ۱.الف. نمودار نیرو بر حسب زمان برای نمونه شاهد

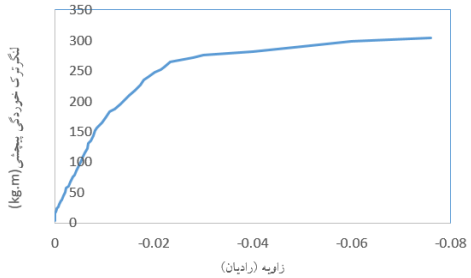


نمودار ۱.ب. نمودار میله‌ای برای سه LVDT استفاده شده برای نمونه شاهد

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 اختیارگذارد و در نتیجه کار مقایسه با دقت بیشتری صورت گیرد.

به منظور کسب اطلاعات دقیق‌تر راجع به نیروی لازم برای ایجاد ترک به منظور ترمیم با روش های مختلف، محاسباتی مطابق مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان صورت 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 برابر۰,۴۲۵ متر است (فاصله آکس مکعب مربع دستکی که دور تا دور بتن قرار می‌گرد تا محل اعمال نیرو). و زاویه قرائت شده برابر فاصله LVDT1 تا آکس نمونه بتنی که تار خنثی نمونه نیز می‌باشد، تقسیم بر عدد قرائت شده ازLVDT شماره ۱.

به طور مثال برای نمونه شاهد آخرین عدد قرائت شده از نیرو به هنگام گسیختگی نمونه برابر با ۱۴۳۰,۶۶ کیلوگرم بود. LVDT1 در این نیرو تغییر مکان 3.8 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 LVDT1 از تار خنثی نمونه بتنی(۵۰ میلی متر) به دست می‌آید، بود. با ضرب میزان نیرو قرایت 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. ب) بارگذاری نمونه شاهد از لنگر ترک خوردگی

باتوجه به نمودار(۲)نمونه شاهد در لنگری برابر با ۳۴۰,۰۲ کیلوگرم متر، به حداکثر ظرفیت پیچشی نهایی خود رسیده است که معادل با زاویه ۰,۰۷۶ رادیان می باشد.

همانطور که مطرح شد، از بین ۶ تیر چهارعدد تا مرحله لنگر ترک خوردگی بارگذاری شده بودند و در دوتا آن‌ها ترمیم از طریق تزریق باکتری صورت گرفته بود، محاسبات لنگر ترک خوردگی پیچشی اعضای بتنی به فرمول جدول ۳. و با توجه به داده های لودسل و LVDT برای نمونه شاهد آورده شده است. مطابق این جدول لنگر ترک خوردگی در زاویه ی ۰,۰۲۳ رادیان، اتفاق می افتد. این عدد معادل نیروی ۱۲۴۶,۵ کیلوگرم می‌باشد.

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
4 (3), 2019
دوره ۴، شماره ۳
پاییز ۱۳۹۸
فصلنامه پژوهشی

جدول ۳ محاسبه لنگر ترک خوردگی پیچشی با استفاده از روابط مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان

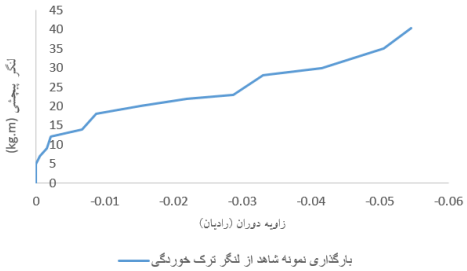
b(m) عرض سطح مقطع	۰,۱۵
d(m) طول سطح مقطع	۰,۱۵
AC(m2) مساحت سطح مقطع	۰,۰۲۵
Øc	۰,۶۵
Pc(m) محیط سطح مقطع	۰,۶
fC(µpa) مقاومت ۵۶ روزه نمونه بتنی	۶۱,۶
Vc(µpa) مقاومت برشی نمونه بتنی	۱,۵۷
Tcr(kg.m) لنگر ترک خوردگی پیچشی	۲۶۴,۸۹

در جدول۳. T_{cr} ,V_c به فرمول(۱) و (۲) می‌باشند.

$$Tcr = \frac{2Ac^2}{Vc * Pc} \quad (۱)$$

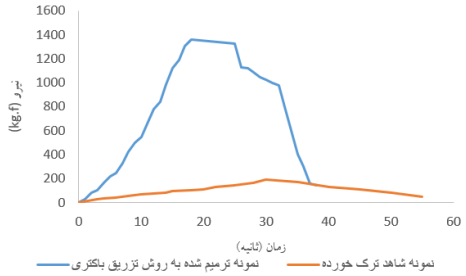
$$Vcr = \sqrt{0.2fc} \quad (۲)$$

از بین ۴ تیر که تا مرحله لنگر ترک خوردگی پیچشی بارگذاری شده بودند، دو تیر توسط باکتری تزریق و ترمیم شد و دوتیر باقی مانده دیگر مجددا بارگذاری گشتند تا لنگر باقی مانده و ظرفیت پیچشی نهایی تیر ترک خورده نیز به دست آید.مطابق نمودار۳. این تیر داری ظرفیت پیچشی نهایی ۴۰,۳۹ کیلوگرم متر می‌باشد.



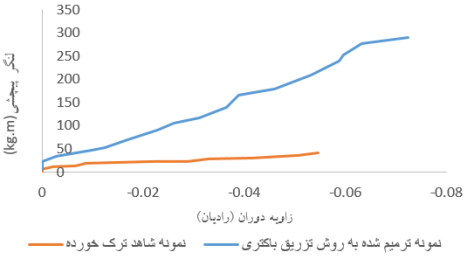
نمودار ۳ بارگذاری نمونه شاهد از لنگر ترک خوردگی

در مرحله بعد دو عدد تیری که توسط تزریق باکتری، ترمیم شده بودند، پس از یک روز از گذشت تزریق باکتری وکامل شدن فرآیند ترمیم، مجددا تا مرحله ظرفیت پیچشی نهایی بارگذاری گردید.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 تزریق باکتری است. مطابق این نمودار، تیر با این روش ترمیم در ۴۳امین ثانیه پس از شروع بارگذاری با بار ۱۳۶۰,۹۹ کیلوگرم به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود رسید. از مقایسه این نمونه با نمونه شاهد می توان نتیجه گرفت که روش فوق سبب افزایش مقاومت پیچشی سازه نسبت به نمونه ترک خورده شده است و در مدت زمان کمتری نسبت به نمونه شاهد به حداکثر مقاومت خود رسیده و زودتر از نمونه شاهد، واژگون گردیده است. به عبارتی روش فوق توانسته مقاومت بتن ترک خورده در برابر نیرو پیچشی وارده را ۷,۱۶برابر کند.



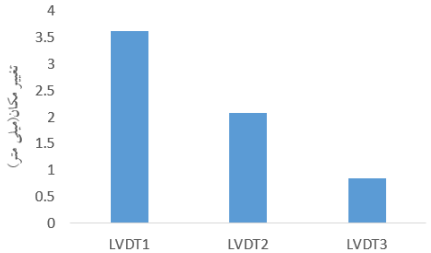
نمودار ۴ نمودار نیرو بر حسب زمان برای نمونه شاهد و نمونه ترمیم شده با روش تزریق باکتری

نمودار۵. نمودار لنگر 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 تزریق باکتری است. مطابق نمودار، تیر یاد شده در لنگری برابر با ۲۸۹,۲۱ کیلوگرم متر و با زاویه ۰,۰۷رادیان به حداکثر ظرفیت نهایی پیچشی خود رسیده است.



نمودار ۵ نمودار لنگر پیچشی برحسب زاویه پیچش برای نمونه شاهد و نمونه ترمیم شده با روش تزریق باکتری

نمودار تغییر مکان برای هر کدام از LVDT های قرار گرفته بر روی تیر ترمیم شده به روش باکتری مطابق نمودار۶.می‌باشد. با توجه به این نمودار تیر در نزدیکی محل دستک دارای بیشترین تغییر مکان به عدد ۳,۶۱۶ میلی متر و در وسط دهانه دارای کمترین تغییر مکان به عدد ۰,۸۴۵میلی متر می‌باشد و در محلی ما بین این دو محل دارای تغییر مکانی به عدد ۲,۰۷۲ میلی متر می‌باشد.



نمودار ۶ نمودار تغییر مکان LVDT های استفاده شده برای نمونه ترمیم شده با روش باکتری

در نتیجه با توجه به نمودارها و توضیحات انجام شده روش استفاده از باکتری باسیلوس ساب تیلیس روشی مناسب برای تیرهای بتنی ترک خورده تحت نیروی پیچشی می‌باشد و استفاده از آن می‌تواند گامی موثر در صنعت ساختمان‌سازی باشد.

JECM
Journal of Engineering & Construction Management
4 (3), 2019
دوره ۴، شماره ۳
پاییز ۱۳۹۸
فصلنامه پژوهشی

۴- نتیجه گیری

این مطالعه با هدف بررسی تاثیر باکتری باسیلوس سابتیلیس در روش‌های خودترمیمی بتن صورت گرفت نتایج گرفته شده به قرار زیر است:

۱. استفاده از باکتری باسیلوس ساب تیلیس گامی موثر در ترمیم بتن می باشد و قادر به ترمیم ترک تا میزانی قابل ملاحظه است. این روش ترمیم قادر به افزایش مقاومت نمونه ترک خورده بتنی به میزان ۷،۱۶ برابر است و از سویی دیگر با مقایسه حداکثر مقاومت پیچشی نهایی این روش ترمیمی با ظرفیت پیچشی نمونه شاهد بارگذاری شده تا مرحله رسیدن به حداکثر ظرفیت پیچشی‌اش، میتوان این نتیجه را گرفت که استفاده از این روش قادر به تامین ۹۵درصد مقاومت اولیه تیر بوده است.

۲. اعداد قرائت شده از LVDT ها گواه این موضوع است که تیر ترمیم شده با این روش دارای تغییر مکان کمتری نسبت به نمونه شاهد بارگذاری شده تا مرحله لنگر نهایی است لیکن با مقایسه این اعداد با اعداد حاصل از بارگذاری تیر ترک خورده تا مرحله لنگر نهایی مشاهده می‌شود که تیر ترمیم شده دارای تغیر مکان بیشتری بوده است.

۳. میزان زاویه پیچشی در تیر ترمیم شده بیشتر از تیر ترک خورده و کمتر از تیر نمونه شاهد است.و علت آن این است که با توجه به روابط مقاومت مصالح با افزایش لنگر ترک خوردگی میزان زاویه پیچشی نیز بیشتر می‌شود، از آنجاییکه زاویه پیچشی دارای رابطه مستقیم با تغییر مکان های حاصل از LVDT های استفاده شده در پژوهش داشت پس بزرگ بودن زاویه پیچش گواه تحمل لنگر بیشتر پیچشی و تبع انجام بهتر ترمیم می‌باشد.

۵- مراجع

[۱] مرشد، ر. و م. س. زارعیان. ۱۳۹۰. "بتن خود ترمیم شونده." سومین کنفرانس بتن ایران. تهران

[۲] Chen, H., Qian, C. and Huang, H., 2016. Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively. Construction and Building Materials, 126, pp.297-303.

[۳] Luo, M. and Qian, C., 2016. Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. Construction and Building Materials, 121, pp.659-663.

[۴] Luo, M., Qian, C.X. and Li, R.Y., 2015. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. Construction and building materials, 87, pp.1-7.

[۵] Wang, J.Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W. and De Belie, N., 2014. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. Construction and Building Materials, 68, pp.110-119.

[۶] Xu, J. and Yao, W., 2014. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. Cement and concrete research, 64, pp.1-10

[۷] Williams, S.L., Kirisits, M.J. and Ferron, R.D., 2017. Influence of concrete-related environmental stressors on biomineralizing bacteria used in self-healing concrete. Construction and Building Materials, 139, pp.611-618.

[۸] Wiktor, V. and Jonkers, H.M., 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 33(7), pp.763-770.

[9] Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. and Schlangen, E., 2010. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological engineering, 36(2), pp.230-235.