نشریه علمی

پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران

جلد ۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۵صص ٤١ الی ٥٠

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۳/۱۴

تاریخ تصویب مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۳

پایگاه نشریه:http://jerce.srttu.edu

# مقاوم‌سازی، تعمیر و افزایش ظرفیت باربری اعضای بتنی توسط روش جدیدی مبتنی بر تزریق اپوکسی

**سید محمدرضا مرتضوی[1*]، مسعود عبدالهی کهریز[2] و بهروز زعیم‌دار[3]**

[1] استادیار، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

[2] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

[3] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

mortazavi@srttu.edu

**چکیده:** در دهه‌ی گذشته تحقیقات چشمگیری در خصوص مقاوم‌سازی، تعمیر و افزایش ظرفیت باربری سازه‌های بتنی توسط محققین انجام شده است. امروزه به دلایل مختلفی از جمله اشتباهات محاسباتی و اجرایی، تغییر کاربری سازه، تدوین آیین‌نامه‌های جدید و ... نیاز به مقاوم‌سازی سازه‌ها احساس می‌شود. در این میان روش‌های نوینی از جمله به‌کارگیری الیاف پلیمری جهت محصور کردن عضو بتنی و تزریق رزین در ترک‌ها تحت فشار به منظور ایجاد پیوستگی در عضو بتنی گسیخته شده معرفی شده‌اند. در این مقاله سعی بر آن است که یک روش جدید مقاوم‌سازی مبتنی بر تزریق اپوکسی معرفی شود که می‌توان از این روش علاوه بر مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری برای تعمیر اعضای بتنی نیز استفاده کرد. در این مقاله روش مذکور با انجام یک مطالعه موردی تشریح شده است. در این راستا تعداد نه نمونه استوانه‌ای تهیه شد که سه نمونه به عنوان شاهد، دو نمونه با چهار حفره و چهار نمونه شامل هشت حفره می‌باشد که تمامی حفرات با متهای به قطر ۱۰ میلی‌متر ایجاد شده و در آن‌ها تزریق توسط اپوکسی صورت گرفته است. هدف بررسی میزان افزایش مقاومت و کاهش کرنش جانبی تحت بارگذاری محوری است. دو نمونه از نمونه‌های هشت حفره‌ای نیز با الیاف پلیمر کربن CFRP محصور شده تا میزان تأثیر استفاده توأمان از روش حاضر و روش رایج محصورشدگی توسط الیاف پلیمری بررسی شود. حفره‌های مذکور در نمونه‌ها با زوایا و فواصل مشخصی از هم ایجاد گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که تزریق اپوکسی به این شیوه موجب افزایش مقاومت و ظرفیت باربری نمونه‌ها در ناحیه غیرخطی شده و از کرنش جانبی کاسته می‌شود. همچنین استفاده توأمان تزریق اپوکسی و محصور کردن توسط الیاف پلیمری نتایج مطلوبی در بر داشته است.

**کلمات کلیدی:** مقاوم‌سازی، تزریق اپوکسی، تعمیر، افزایش مقاومت، الیاف پلیمری

# Retrofitting, Rehabilitation and Increasing the Load Capacity of Concrete Members by a New Method Based on Epoxy Injection

S. M. Mortazavi, M. A. Kahriz and B. Zaeemdar

***Abstract:*** In the past decade significant research on strengthening, repair and increasing load capacity of concrete structures is carried out by the researchers. Meanwhile, the new methods including the use of polymer fibers to provide confinement for concrete and injecting resin under pressure to fill the concrete cracks for a better continuity of a failed member are introduced. This paper introduces a new approach for strengthening a concrete member based on epoxy injection and in addition to strengthening and increasing the load capacity to repair concrete members. In this study, nine cylindrical samples were prepared, three as control specimens, two specimens with four holes and four specimens with eight holes. All holes with a diameter of 10 mm provided by drill and then epoxy injection were carried out. The purpose was to determine the strength increase and to reduce the lateral strain under axial loading. Two specimens with eight holes confined with carbon fiber reinforced polymers (CFRP) to observe the effect of such a confinement comparing to the normal confinement provided by CFRP. These holes were created in specimens with specific angles and distances from each other. The results show that the suggested epoxy injection method increased the strength and load capacity of the specimens in the non-linear range and the lateral strain is reduced. Epoxy injection plus confinement provided by CFRP resulted in a better performance.

***Keywords:*** Rehabilitation, Retrofitting, Epoxy Injection, Strength.

## ۱– مقدمه

در دهه‌ی گذشته تحقیقات چشمگیری در خصوص مقاوم‌سازی، تعمیر و افزایش ظرفیت باربری سازه‌های بتنی توسط محققین انجام شده است. امروزه به دلایل مختلفی از جمله اشتباهات محاسباتی و اجرایی، تغییر کاربری سازه، تدوین آیین‌نامه‌های جدید و ... نیاز به مقاوم‌سازی سازه‌ها احساس می‌شود. در این میان روش‌های نوینی از جمله به‌کارگیری الیاف پلیمری جهت محصور کردن عضو بتنی و تزریق رزین در ترک‌ها تحت فشار به منظور جوش دادن عضو بتنی گسیخته شده معرفی شده‌اند.

بتن یکی از انواع مصالحی است که به دلیل خواص مقاومتی که دارد امروزه بیشتر از سایر مصالح در ساخت انواع بناها از قبیل پل‌ها، سدها، تونلها، ساختمان و روسازی فرودگاه‌ها و ساختمان بناهای مسکونی و اداری و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد .با توجه به اهدافی که از ساخت یک بنا دنبال می شود، بتن و فولاد به تنهایی و یا به صورت مکمل کاربرد پیدا می کنند [۲].

بتن متشکل از سنگدانه‌هایی است که با دانه بندی مورد نظر با سیمان و آب ترکیب شده و مخلوطی ایجاد می‌شود که پس از جذب آب توسط سیمان (فرایند شیمیایی هیدراتاسیون) کسب مقاومت کرده و به جسمی سخت تبدیل می‌شود [۳].

در واقع محیط بتن به مثابه سنگدانه هایی است که توسط یک ماده چسباننده (سیمان ) در کنار یکدیگر قرار گرفته اند .مشخصات مکانیکی این محیط به پیوستگی بین سنگدانه ها و خمیر سیمان بستگی دارد. از جمله مشخصات مکانیکی بتن می‌توان به مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن اشاره کرد .این دو مشخصه، پارامترهای تعیین کننده‌ای در رفتار سازههای ساخته شده از بتن دارند .با توجه به ماهیت مخلوطی بتن، آزمایش بر روی مشخصات مکانیکی بتن نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن نسب به مقاومت فشاری آن بسیار کمتر می‌باشد. در نتیجه در سازه‌های مختلف طراحی اجزاء بتنی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که از مقاومت فشاری بتن استفاده شود. مقاومت فشاری بتن در مقاومت خمشی و محوری اعضای بتنی ظاهر می‌شود. در صورتی که مقاومت کششی بتن عمدتا در مقاومت برشی این اعضاء ظاهر خواهد شد [۴].

در این مقاله سعی بر آن است که یک روش جدید مقاوم‌سازی مبتنی بر تزریق اپوکسی معرفی شود که می‌توان از این روش علاوه بر مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری برای تعمیر اعضای بتنی نیز استفاده گردد. در این مقاله روش مذکور با انجام یک مطالعه موردی تشریح شده است. در این راستا تعدادی نمونه استوانه‌ای تهیه شده که حفراتی توسط مته‌ای به قطر ۱۰ میلی‌متر در آن‌ها ایجاد شده و پس از تمیز کردن حفرات، داخل آن‌ها تزریق توسط اپوکسی صورت گرفته است.

هدف تحقیق، بررسی میزان افزایش مقاومت و کاهش کرنش جانبی تحت بارگذاری محوری است. بدین منظور نمونه‌های آماده شده در آزمایشگاه توسط جک‌های فشاری تا حد شکست بارگذاری شده و منحنی‌های تنش-کرنش متناظر هر تیپ از نمونه‌ها ترسیم می‌گردند.

تحقیقات انجام پذیرفته در زمینه‌ی ترک‌ها و علل پیدایش و همچنین راه کارهای مقابله با آن، امروزه بصورت کاربردی در آیین‌نامه ACI-440.2R-02 گرد آوری شده است [۵].

همچنین می‌توان از مقاله‌ی R.A.Linares در اوایل دهه‌ی ۹۰، پیرامون مقاوم‌سازی اعضاء بتنی آسیب دیده‌ی بیمارستان بنجامین بلوم – تحت اثر زلزله سن سالوادور (اکتبر ۱۹۸۶) – با تزریق رزین اپوکسی یاد کرد که این مقاله به نتایجی تجربی در زمینه‌ی تأثیر میزان فشار تزریق اشاره کرده است [۶].

علاوه بر آن می‌توان به مواردی مشابه در سال ۲۰۰۷ توسط Issa & Debs در خصوص تزریق درون ترک‌ها و یا در سال ۲۰۰۹ توسط Domenico و Felicetti اشاره کرد [۷ و ۸].

## ۲- آماده سازی نمونه‌ها

در ابتدای امر تعداد نه عدد نمونه استوانه‌ای استاندارد (با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر) با طرح اختلاط و شرایط یکسان مطابق جدول ۱ تهیه و به منظور عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار داده شدند. سه نمونه از این تعداد به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. در دو نمونه توسط مته چهار حفره ایجاد شد با ذکر این توضیح که دو حفره در موقعیت ساعت ۳ و دو حفره در موقعیت ساعت ۹ (همان‌گونه که در شکل ۲ به صورت شماتیک ترسیم شده) قرار دارد. در چهار نمونه دیگر هشت حفره ایجاد شد که در هر یک از موقعیت‌های ساعت ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دو حفره قرار دارند. تمامی حفرات با مته‌ای به قطر ۱۰ میلی‌متر ایجاد شده و در آن‌ها تزریق توسط اپوکسی صورت گرفته است. دو نمونه از نمونه‌های هشت حفره‌ای نیز با الیاف پلیمر کربن CFRP محصور شده تا میزان تأثیر استفاده توأمان از روش حاضر و روش رایج محصورشدگی توسط الیاف پلیمری بررسی شود. برای نمونه‌هایی که قرار است با الیاف پلیمری محصور شوند به دلیل اهمیت کیفیت پیوند بین الیاف پلیمری و سطح بتن، باید از کیفیت سطح بتن اطمینان حاصل کرد. به این منظور پریدگی‌های اطراف حفره‌های ایجاد شده ناشی از عملیات سوراخ‌کاری با بتونه پر شده و قسمت‌های زائد و خشن با سنباده صاف شده تا سطحی کاملاً صیقلی فراهم شود. بتونه‌ها از ترکیب سیمان، پودر سنگ و اپوکسی تهیه شد تا از مقاومت و استحکام کافی برخوردار باشد.

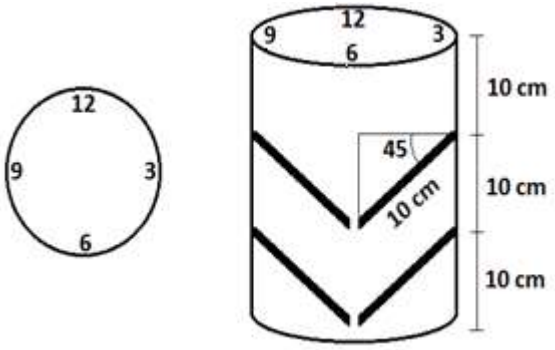
**جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های استوانه‌ای**

| مقاومت فشاری (MPa) | نسبت آب به سیمان $(\frac{W}{C})$ | سیمان $(\frac{Kg}{m^3})$ | آب $(\frac{Kg}{m^3})$ | ماسه $(\frac{Kg}{m^3})$ | شن $(\frac{Kg}{m^3})$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱۴ | ۰/۶۵ | ۳۴۲ | ۲۲۵ | ۴۸۵ | ۱۱۸۴ |

**شکل ۱: عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب**

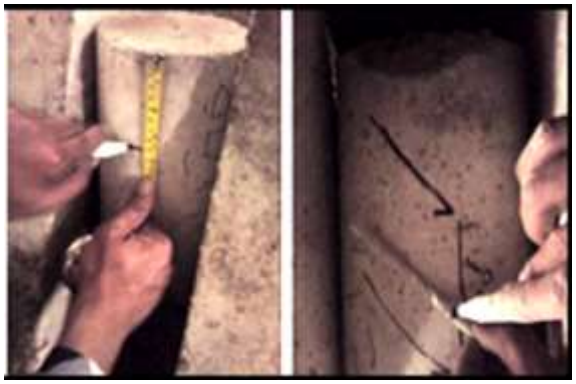
### ۲-۱- عملیات مته کاری و ایجاد حفره‌ها

همان‌طور که در بخش ۳ اشاره شد در نمونه‌ها حفره‌هایی به عمق و فاصله ۱۰ سانتی‌متر از سطوح فوقانی و تحتانی نمونه توسط مته‌ای به قطر ۱۰ میلی‌متر ایجاد گردید. زاویه حفره‌ها نسبت به افق ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. در دو نمونه توسط مته چهار حفره (دو حفره در موقعیت ساعت ۳ و دو حفره در موقعیت ساعت ۹) ایجاد شد. در چهار نمونه نیز هشت حفره ایجاد شد (در هر یک از موقعیت‌های ساعت ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دو حفره مجموعاً هشت حفره). برای درک بهتر، موقعیت حفره‌ها در شکل ۲ به صورت شماتیک ترسیم شده است.




**شکل ۲: نمایش موقعیت حفره‌ها به صورت شماتیک**

در شکل ۳ نیز نحوه‌ی پیاده سازی و اجرای سوراخ‌ها در آزمایشگاه به تصویر کشیده شده است.



**شکل ۳: جزئیات ایجاد حفره‌ها و محاسبه عمق حفره**

## ۲-۲- تمیز کردن سوراخ‌های ایجاد شده

با وجود تمامی امتیازاتی که این روش داراست بایستی محدودیت‌های آن را نیز خاطر نشان کرد؛ که از آن جمله سطح بتن مادر بایستی مقاوم، تمیز و برای بیشتر سیستم‌های اپوکسی خشک باشد. بدین ترتیب نخستین مرحله پیش از تزریق، تمیز کردن سطح بیرونی و درونی حفره ایجاد شده است و این امر به جهت ایجاد هر چه دقیق‌تر پیوستگی و یکپارچگی میان بتن و اپوکسی تزریق شده الزامی است. توصیه می‌شود با برس سیمی محل حفرات پیش از تزریق غبار زدایی گردد چرا که ممکن است به دلیل سایش مکانیکی بتن در حین سوراخ‌کاری گرد و غبار ناخواسته‌ای در محل سوراخ‌ها قرار بگیرد. وجود روغن، گریس، خاک و یا ذرات ریز بتن خرد شده مانع از نفوذ مناسب اپوکسی و چسبندگی آن است. چنانچه در محل ترمیم، آلودگی وجود دارد ترجیحاً بهتر است با هوای فشرده، آب و یا دیگر حلال‌های مناسب به برطرف کردن آن اقدام شود و لازم به توضیح است در صورت استفاده از حلال‌ها، پس از برطرف شدن آلودگی بایستی تا خروج کامل حلال از سطح ترمیم از هرگونه اقدامی خودداری گردد. همچنین در صورت بکار گرفتن آب برای تمیز کردن سوراخ‌ها می‌توان از هوای فشرده و گرم به منظور سرعت بخشیدن به خشک شدن حفره‌ها پیش از تزریق اپوکسی‌های حساس به رطوبت استفاده کرد [۹ و۱۰]. در پژوهش حاضر، محل حفره‌های ایجاد شده ابتدا با برس سیمی تمیز شده (شکل ۴) و سپس داخل آن با پمپ هوا دمیده شد (شکل ۵) تا گرد و غبار موجود زدوده شده و تزریق با کیفیت بالا انجام شود. پس از آن حفره‌ها با اپوکسی تزریق می‌شوند.

**شکل ۴: تمیز کردن سوراخ توسط برس**

**شکل ۵: تمیز کردن سوراخ توسط پمپ باد**

## ۳-مشخصات مصالح

از سال ۱۹۴۰ که اپوکسی‌ها در صنعت راه و ساختمان به کار گرفته شدند، از آن‌ها برای چسباندن قطعه‌های ساختمانی، تزریق ترک‌ها، پوشش‌ها، تعمیرات تکه‌ای، تحکیم پیچ‌ها، تحکیم پایه‌ی ماشین‌آلات، به‌کارگیری در سطوح تحت سایش و اعمال در کارهای زیر آبی (به عنوان ماده چسباننده) استفاده شده است. نام اپوکسی از این واقعیت منشأ می‌گیرد که مولکول‌های این سیستم از رزین‌ها، دارای کربن و اکسیژن هستند و به همین علت اپوکسیدها نامیده می‌شوند. اتم اکسیژن به دو اتم کربن اتصال دارد و این اتم‌های کربن نیز به طرق دیگری به یکدیگر متصل هستند. ساده‌ترین نوع اپوکسیدها، اکسید اتیلن است و واکنش رزین‌های اپوکسی وابسته به نوع گروه‌های اکسید اتیلن می‌باشد [۱].

گروه‌های اپوکسید به خاطر داشتن ساختمان مولکولی خاص، دارای مشخصه عکس‌العمل بسیار بالایی بوده و در واقع می‌توانند با بیش از ۵۰ نمونه شیمیایی مخلوط شده و سیستم‌های عمل‌آمده و سخت شده رزینی را ایجاد کنند [۱]. برخی خواص رزین‌های اپوکسی عبارتند از:

۱- مقاومت بسیار زیاد در برابر خوردگی
۲- زمان پخت کم
۳- زمان کم برای رسیدن به استحکام ساختمانی
۴- چسبندگی مناسب به سطوح فلزی
۵- مقاومت سایشی بالا
۶- استحکام مکانیکی بالا
۷- مقاومت در برابر مواد شیمیایی مخرب
۸- چروکیدگی کم در حین پخت
۹- عدم تولید محصولات فرار جانبی در واکنش پخته شدن
۱۰- حفظ خواص و سازگاری حرارتی با فولاد در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد [۱].

مواد اپوکسی که قرار است برای ترمیم عضو بتنی بکار گرفته شوند بایستی مطابق مشخصات فنی ASTM C 881 [۴] باشد که بر پایه سیستم چسبندگی در بتن تشریح شده است.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد مشخصات فنی ASTM به تشریح گونه‌های مختلف رزین اپوکسی که می‌توان در بتن به کار گرفت پرداخته است لذا بایستی پیش از تزریق به تفکیک و انتخاب نوع رزین، دما و همچنین درجه لزجت آن مطابق این ضوابط پرداخت. آیین‌نامه ASTM بر اساس نوع اپوکسی، رزین‌ها را به هفت کلاس مختلف دسته‌بندی کرده است [۱۱].

نوع ۱: این نوع برای اتصال دو قطعه بتن که سخت شده‌اند (اصطلاحاً کهنه یا قدیمی‌اند) و باربر نمی‌باشند استفاده می‌شود.

نوع ۲: برای اتصال دو قطعه بتن که یکی تازه و دیگری قدیمی باشد و همچنین قطعات باربر نباشند از این نوع می‌توان استفاده نمود.

نوع ۳: برای آن دسته از اتصالاتی که دو عضو بر روی هم قرار می‌گیرند به عنوان ملات پرکننده و یا چسب اتصال استفاده می‌شود.

نوع ۴: این نوع برای اتصال دو قطعه بتن که سخت شده‌اند (اصطلاحاً کهنه یا قدیمی‌اند) و باربر می‌باشند استفاده می‌شود.

نوع ۵: برای اتصال دو قطعه بتن که یکی تازه و دیگری قدیمی است و همچنین قطعات باربر می‌باشند استفاده می‌شود.

نوع ۶ و نوع ۷ نیز به ترتیب برای استفاده در قطعات پیش‌ساخته و قطعات درزگیر استفاده می‌شوند.

جدول شماره ۲ به تشریح گونه‌های اپوکسی با در نظرگیری شرایط اتصال بتنی و بارگذاری عضو و جدول شماره ۳ به تشریح دمای مناسب استفاده از اپوکسی‌ها پرداخته است.

**جدول ۲: تشریح گونه‌های اپوکسی مطابق ASTM C 881**

| نوع اپوکسی | شرایط بارگذاری | نوع اتصال بتن |
|---|---|---|
| نوع ۱ | غیر باربر | قدیمی به قدیمی |
| نوع ۲ | غیر باربر | تازه به قدیمی |
| نوع ۳ | - | روی هم |
| نوع ۴ | باربر | قدیمی به قدیمی |
| نوع ۵ | باربر | تازه به قدیمی |
| نوع ۶ | - | قطعات پیش‌ساخته |
| نوع ۷ | - | قطعات درزگیر |

**جدول ۳: کلاس‌بندی بر اساس دمای اجرا $^{\circ}$ (درجه سانتی‌گراد)**

| | |
|---|---|
| کلاس A | کمتر از $4,4^{\circ}$ |
| کلاس B | بین $4,4^{\circ}$ و $15,6^{\circ}$ |
| کلاس C | بالاتر از $15/6^{\circ}$ |
| کلاس D | بین $4/4^{\circ}$ و $18/3^{\circ}$ |
| کلاس E | بین $15/6^{\circ}$ و $26/7^{\circ}$ |
| کلاس F | بین $23/9^{\circ}$ و $32/2^{\circ}$ |

در جدول شماره ۳ کلاس‌های A، B و C برای اپوکسی‌های نوع ۱ الی ۴ تعریف شده است و همچنین کلاس‌های D، E و F برای نوع ۶ و ۷ به‌تناسب دمای مورد نیاز بکار گرفته می‌شوند.

در خصوص درجه‌ی لزجت اپوکسی‌ها، این استاندارد آن‌ها را به ۳ درجه تقسیم‌بندی نموده است که درجه‌ی اول آن برای اپوکسی‌های با لزجت کم، درجه‌ی دوم آن برای لزجت متوسط و درجه سوم آن به اپوکسی‌های خمیری (ژله‌ای) اختصاص‌یافته است.

ویسکوزیته مناسب اپوکسی بستگی به عواملی از قبیل اندازه، ضخامت و میزان دسترسی به ترک دارد. به‌عنوان مثال برای ترک‌هایی به عرض ۰/۳ میلی‌متر یا کمتر تزریق اپوکسی با ویسکوزیته ۵۰۰ سانتی پویز کفایت دارد و برای ترک‌های عریض‌تر یا با سطح دسترسی کمتر تزریق (وقتی فقط دسترسی به یک وجه امکان‌پذیر باشد) ویسکوزیته ژله‌ای متوسط مناسب است.

با توجه به موارد تشریح شده در آیین‌نامه ASTM در خصوص ویسکوزیته، دما و انواع اپوکسی‌ها، از چسب Epoxy Dur31N برای تزریق درون حفرات استفاده شد. همچنین در این تحقیق برای انجام تقویت و محصورسازی خارجی دو نمونه از ورقه‌های CFRP به ضخامت ۱ میلی‌متر و به روش لایه‌ای مرطوب ( Wet ley up) استفاده شده است. ازآنجا که برای اتصال ورق به‌صورت لایه‌ای مرطوب اشباع الیاف با رزین‌های اپوکسی ضروری است لذا از چسب Epoxy Dur300 برای آغشته سازی الیاف و اتصال بر بستر بتنی استفاده شده است. شایان ذکر است که Epoxy Dur31N از غلظت بیشتری نسبت به چسب Epoxy Dur300 برخوردار است و به همین علت برای تزریق و پر کردن حفره‌های ایجاد شده از Epoxy Dur31N استفاده شده است.

مشخصات مکانیکی الیاف و چسب‌های مورد استفاده به ترتیب در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

شکل‌های ۶ و ۷ چسب‌های اپوکسی و ورق‌های CFRP استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهند.

**جدول ۴: مشخصات مکانیکی ورق CFRP**

| وزن واحد سطح $gr/m^2$ | مقاومت کششی MPa | مدول الاستیسیته کششی MPa | مدول الاستیسیته خمشی MPa | کرنش گسیختگی % |
|---|---|---|---|---|
| ۲۰۰ | ۳۹۰۰ | ۲۳۰۰۰۰ | - | ۱/۶۹ |

**جدول ۵: خواص مکانیکی رزین مصرفی**

| نوع چسب | مقاومت کششی MPa | مدول الاستیسیته کششی MPa | مدول الاستیسیته خمشی MPa |
|---|---|---|---|
| Epoxy Dur300 | ۴۵ | ۳۵۰۰ | ۲۸۰۰ |
| Epoxy Dur31N | ۲۴/۸ | ۵۲۰۰ | ۶۹۰۰ |

الف) Epoxy Dur31N ب) Epoxy Dur300

**شکل ۶: چسب‌های اپوکسی بکار گرفته شده**

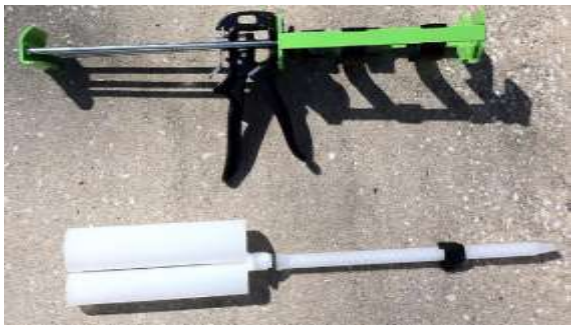
**شکل ۷: الیاف کربن مورد استفاده در این تحقیق**

## ۴- روند مقاوم‌سازی

### ۴-۱ تزریق چسب درون حفرات ایجاد شده

با استفاده از پمپ‌های هیدرولیکی، کمپرسورهای الکتریکی، تفنگ هوا، کپسول ارتجاعی، سرنگ و ... می‌توان به انجام تزریق پرداخت. لکن بایستی دستگاه و فشار اعمالی ناشی از آن با دقت انتخاب شود چرا که هرچند فشار بیشتر دستگاه، به سرعت تزریق شتاب می‌بخشد اما ممکن است باعث افزایش فعالیت ترک در سطوح جدیدتری گردد و آسیب‌های بیشتری به ارمغان

آورد [۹]. در پژوهش حاضر از تفنگ مخصوص تزریق اپوکسی (شکل ۸) برای تزریق با فشار و اطمینان از پر شدن کامل حفرات توسط چسب استفاده گردید.



**شکل ۸: تفنگ مخصوص تزریق اپوکسی**

### ۲-۴ نصب ورق‌های CFRP

با توجه به اینکه در این پژوهش دو نمونه علاوه بر تزریق اپوکسی با ورق‌های CFRP نیز محصور شده‌اند لذا تمهیدات لحاظ شده جهت نصب این ورق‌ها به‌صورت مختصر بیان می‌گردد.

بر اساس آیین‌نامه ACI440-02 [۵] قبل از نصب CFRP لازم است آماده‌سازی سطحی صورت گیرد. آماده‌سازی سطحی به‌منظور فراهم کردن بستری مناسب جهت اتصال CFRP به سطح بتن و در نتیجه افزایش کارایی عضو تقویت‌شده انجام می‌شود.

مراحل آماده‌سازی در این پژوهش به ترتیب زیر می‌باشد:

۱. در ناحیه‌ای که ورق CFRP نصب می‌شود، لایه‌ی ضعیف سطحی بتن با استفاده از سنگ سمباده مخصوص با دقت برداشته می‌شود به‌طوری که سطح دانه‌های شن و ماسه نمایان گردند.

۲. با استفاده از فشار هوا، گرد و غبار باقی مانده در سطح بتن برداشته می‌شود و سطح بتن کاملاً تمیز می‌گردد.

۳- با استفاده از چسب اپوکسی مخصوص و بتونه تهیه شده سطح بتن ترمیم و خوردگی‌های موجود جهت جلوگیری از تمرکز تنش پر شده به‌طوری که سطح تمام نمونه صاف و هموار گردد.

۴- پس از انجام آماده‌سازی سطحی، سطح مورد نظر جهت مقاوم‌سازی را با لایه‌ای از چسب Epoxy Dur300 اندود کرده، سپس الیاف کربن را بر روی آن قرار داده به‌طوری که هیچ هوای محبوس و اعوجاجی در الیاف چسبیده به بتن دیده نشود و در پایان با یک لایه‌ی دیگر از همان چسب روی الیاف اندود می‌شود.

همچنین شایان ذکر است از یک لایه‌ی CFRP استفاده و میزان هم‌پوشانی الیاف پلیمری ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد [۵ و ۱۲].

## ۵- نتایج آزمایش

پس از تقویت نمونه‌ها و گذشت زمان عمل‌آوری، مطابق شکل ۹ آزمایش فشاری روی نمونه‌ها انجام گردید. همچنین در حین آزمایش برای تعیین میزان کرنش محوری و جانبی، سه عدد LVDT برای ثبت جابجایی‌ها تعبیه گردید با این توضیح که دو عدد LVDT یک سانتی‌متری برای ثبت جابجایی جانبی و یک LVDT پنج سانتی‌متری برای ثبت جابجایی محوری بکار گرفته شد (شکل ۹). نمونه‌ها تحت بار قرار می‌گیرند. بار با سرعت حدود ۴ کیلو نیوتن بر دقیقه به نمونه اعمال گشت. با استفاده از دیتا لاگر میزان نیرو و جابجایی‌های متناظر عمودی و افقی تا لحظه شکست ثبت گردیده و میزان تنش را از تقسیم نیرو بر سطح مقطع بدست آورده و از تقسیم جابجایی عمودی به ارتفاع کرنش محوری و از تقسیم جابجایی افقی به قطر نمونه میزان کرنش جانبی بدست می‌آید.

**شکل ۹: انجام تست فشار روی نمونه‌ها**

**شکل ۱۰: نحوه شکست در نمونه ۸ حفره‌ای که علاوه بر تزریق اپوکسی با الیاف پلیمری نیز محصور گشته است.**

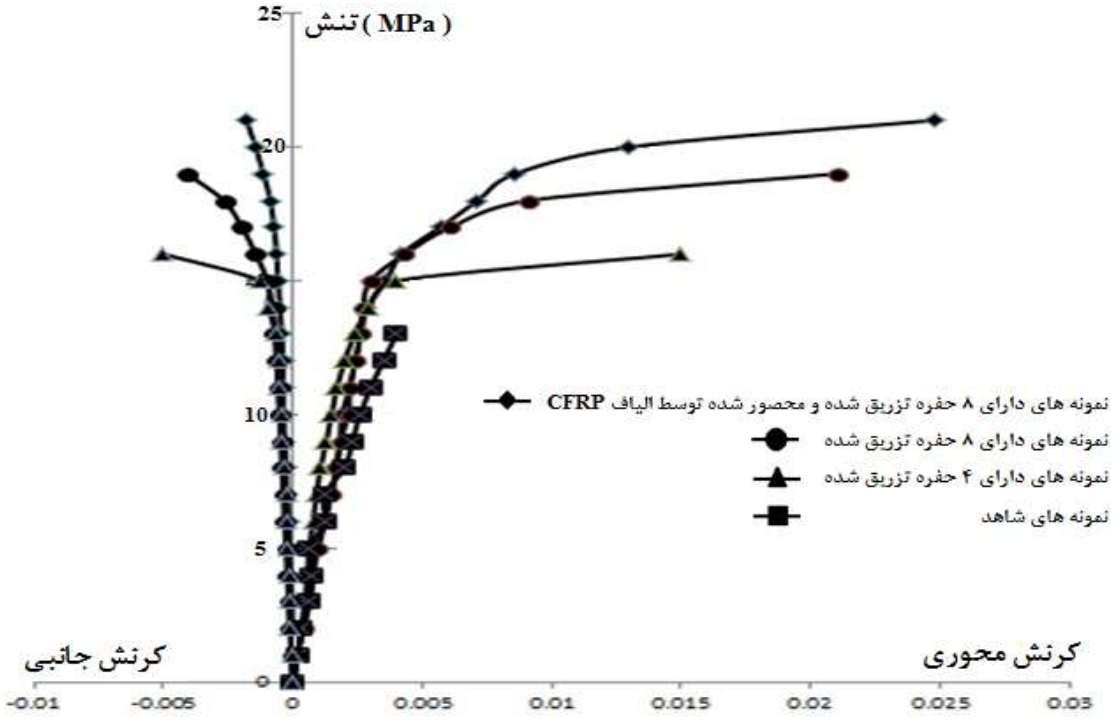
پس از اتمام آزمایش، میزان تنش و کرنش‌های متناظر محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم شدند. شکل ۱۱ نمودار تنش-کرنش هر تیپ از نمونه‌های استفاده شده را نشان می‌دهد. جدول ۶ نیز حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های شکسته شده را نشان می‌دهد (توضیح اینکه مقادیر جدول میانگین مقاومت نمونه‌های مشابه را نشان می‌دهند).

**جدول ۶: نتایج حاصل از تست فشار روی نمونه‌ها**

| مشخصات نمونه | میانگین حداکثر مقاومت فشاری حاصل از تست فشار (MPa) |
|---|---|
| نمونه‌های شاهد | ۱۴/۴ |
| نمونه‌های دارای ۴ حفره تزریق شده | ۱۵/۸ |
| نمونه‌های دارای ۸ حفره تزریق شده | ۱۸/۸ |
| نمونه‌های دارای ۸ حفره تزریق شده و محصورشده توسط الیاف CFRP | ۲۰/۷ |

## ۶- نتیجه گیری

افزودن الیاف پلیمری کربن و تزریق اپوکسی موجب افزایش سختی و مقاومت می‌شود. با دقت در شکل ۱۱ می‌توان فهمید که در ناحیه خطی تقریباً نمودارها بر هم منطبق می‌باشند (به عبارت دیگر سختی در ناحیه




**شکل ۱۱. مقایسه‌ی نمودار تنش-کرنش (محوری و جانبی) در نمونه‌ها**

خطی تقریباً ثابت است) اما در قسمت غیر خطی شاهد افزایش سختی می‌باشیم. با توجه به اعداد و نمودارها مشاهده می‌شود که نمونه‌های ۴ حفره‌ای نسبت به نمونه‌های شاهد ۱/۴ مگاپاسکال افزایش مقاومت داشتند که به عبارتی در اثر تزریق اپوکسی در ۴ حفره در حدود ۱۰٪ افزایش مقاومت حاصل شده است. این افزایش مقاومت برای نمونه‌های ۸ حفره‌ای به ۴/۴ مگاپاسکال در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌رسد که به عبارتی افزایش ۳۰ درصدی را نشان می‌دهد. افزایش مقاومت برای نمونه‌های ۸ حفره‌ای که علاوه بر تزریق در حفرات با یک لایه CFRP نیز محصور شده‌اند به ۶/۳ مگاپاسکال (تقریباً ۴۴ درصد افزایش) در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌رسد. لذا استفاده توأمان روش تزریق اپوکسی و روش رایج محصورشدگی توسط الیاف پلیمری نتیجه‌ی مطلوبی در بر داشته است. ضمناً این افزایش مقاومت با کاهش در کرنش‌های جانبی و محوری همراه می‌باشد. بدیهی است در نمونه‌هایی که با الیاف پلیمری محصور شده‌اند کاهش کرنش‌های جانبی چشم‌گیرتر است.

همان‌طور که اشاره شد از دقت در نمودارها اینطور بر می‌آید که تزریق اپوکسی موجب می‌شود که سختی نمونه در قسمت غیر خطی دست‌خوش تغییر شود. با افزایش سختی تحمل کرنش محوری یا به عبارتی شکل‌پذیری نمونه نیز بیشتر می‌شود و بتن مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. همچنین از نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که این نوع تزریق باعث کاهش در کرنش جانبی نمونه‌ها شده است و در نمونه‌هایی که علاوه بر تزریق از الیاف پلیمری جهت محصور کردن استفاده شده است این کاهش بیشتر به چشم می‌آید. می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با افزایش حفره‌ها و تعداد تزریق‌ها می‌توان مقاومت فشاری و شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش و کرنش جانبی نمونه‌ها را کاهش داد.

همچنین با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که نحوه‌ی شکست در نمونه شاهد از طریق تشکیل ترک‌های عمودی می‌باشد. در نمونه‌های تزریق شده نیز با تشکیل ترک‌های عمودی شکست نمونه از وسط نمونه به دو نیم استوانه رخ داده است. شکل ۱۰ نحوه‌ی زوال نمونه‌های استوانه‌ای ۸ حفره‌ای که با چسب اپوکسی تزریق و با الیاف پلیمر کربن محصور گشته‌اند را نشان می‌دهد. چنانچه در این تصاویر دیده می‌شود، عمده‌ی زوال این نمونه‌ها از ناحیه‌ی میانی ارتفاع آغاز می‌شود. در این ناحیه تنش‌های محوری خالص حاکم بوده و اثرات محصورسازی تنش (ناشی از وجود تکیه‌گاه بالا و پایین) در این ناحیه وجود ندارد. لذا در نمونه‌هایی که علاوه بر تزریق اپوکسی در حفرات از الیاف پلیمری جهت محصورشدگی استفاده شده مود شکست کاملاً متفاوت بوده و شکست از جنس گسیختگی الیاف در جهت پیرامونی و خرد شدن بتن می‌باشد که در قسمت میانی رخ می‌دهد (شکل ۱۰).

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش، استفاده توأمان از روش تزریق اپوکسی همراه با محصور کردن توسط الیاف پلیمری جهت مقاوم‌سازی، تعمیر و افزایش ظرفیت باربری اعضای بتنی پیشنهاد می‌گردد.

## مراجع


[۱] نادری، محمود؛ *آسیب شناسی و بهسازی سازه های بتنی*، انتشارات شرکت ابزار خاک، فروردین ۱۳۷۳.

**[2]** Marukha, V. I., and V. P. Sylovanyuk. *Injection technologies for the repair of damaged concrete structures*. Springer,, 2014.

**[3]** Jose, J. S., Balasubramanian, M. Experimental *Investigation on Characteristics of Polythene Waste Incorporated Concrete*, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 10 Number 7 , 2014.

**[4]** Raghatate Atul, M. "Use of plastic in a concrete to improve its properties."*International journal of advanced engineering research and studies* (2012).

**[5]** Soudki, K., and T. Alkhrdaji. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2 R-02)." *ASCE 2005 structures congress April*. 2005.

**[6]** R.A.Linares; "*Epoxy Resin Techniques applied For Repairing* "Benjamin Bloom" Hospital Damaged by the San Salvador Earthquake" October 1986.

**[7]** Issa, C.A. & Debs. P " *Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete*"; Construction and Building Materials 21: 157–163. 2007.

**[8]** R. Felicetti- V.H. De Domenico "*Cracked concrete repair with epoxy-resin infiltration*" 2009.

**[9]** Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures", Reported by ACI Committee 224 Reapproved 2013.

**[10]** Repair Evaluation Maintenance Rehabilitation Technical Note CS-MR-3.9 Crack Repair Method: Epoxy Injection",USA Army Nov 2011.

**[11]** ASTM C 881-90 Epoxy Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete 2005.

**[12]** Michael K., Catherine G., Costas P., Triantafillou C, "Experimental Investigation of Nonconventional Confinement for Concrete Using FRP", Journal of Composites for Construction © ASCE / November/December 2005.