

بررسی خوردگی میلگردهای خاص در سازه‌های بتُنی

حسین نوذری (دانشجوی دکتری)

ارسطو ارمغانی^{*} (استاد)

کمال رحمانی (استادیار)

صابر پیروتی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد ایران

مهننسی عمران شریف، (پیز ۱۴۰۲) دری ۱۳۹۸ شمسی، ۳، صص. ۱۱۳-۱۱۵، پژوهشی

در پژوهش حاضر، میلگردهای فولادی کربن متوسط با اندازه‌های مختلف و تعدادی نمونه از میلگرد با پوشش اپوکسی و همچنین فیبری آزمایش و تأثیر خوردگی شبیه‌سازی شده در نمونه‌های اخیر پس از اندازه‌گیری خواص مکانیکی، مطالعه و بررسی شده‌اند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در میلگرد سایز ۱۴ میلی‌متر، با پیشرفت خوردگی به اندازه ۶۸٪ میلی‌متر، مقدار نیروی تحمل شده به میزان ۷/۱۶٪ از (۸۵ KN) کاهش داشته است. همچنین در مرحله‌ی بعدی با ۶۲٪ میلی‌متر پیشرفت خوردگی، مقدار نیروی مذکور از ۸۵ KN به ۷۶/۳ KN رسیده است (یعنی ۱۰٪ کاهش). در مرحله‌ی سوم با پیشرفت ۹۶٪ میلی‌متر، مقدار نیروی تحمل شده توسط میلگرد از ۷۶/۳ KN به ۶۹/۷ KN رسیده است، که معادل کاهش ۵٪ بوده است. این نتایج را می‌توان در سایزهای دیگر هم که آزمایش شده‌اند، مشاهده کرد. همچنین انجام آزمایش هالف سل نشان داد که مقاومت میلگرد اپوکسی در مقایسه با میلگرد معمولی بسیار بیشتر بوده است.

nozarihossein671@gmail.com
armaghaniarastoo@gmail.com
mohandes_so@yahoo.com
s.piroti@iau-mahabad.ac.ir

وازگان کلیدی: خوردگی، میلگرد با پوشش اپوکسی، آزمایش هالف سل، میلگرد فیبری.

۱. مقدمه

استحکام فولاد، که به عنوان ماده‌ی مهندسی استفاده شده در بتن شناخته می‌شود، در مقایسه با استحکام بتن خیلی بیشتر است. خوردگی، پدیده‌یی است که باعث از بین رفتن تدریجی مواد و اثر مواد و محیط خورنده می‌شود. خوردگی فولاد استفاده شده در بتن اثر یک فرایند الکترو شیمیایی، یعنی هم زمانی فرایند شیمیایی و جریان الکتریکی است. دلیل اصلی توجه و انتخاب پژوهش حاضر، هزینه‌های هنگفت بازسازی و تعمیر سازه‌ها در اثر خوردگی از یک طرف و از سوی دیگر، هزینه‌های تولید و همچنین نقل و انتقال میلگردهای جایگزین از طرفی دیگر است. یکی از راه‌های ساده این است که از میلگرد با جنس فولاد آلیاژی، که در مقابل خوردگی مقاوم است، استفاده شود؛ ولی این کار از نظر اقتصادی مقرر نبود. صرفه نیست و هزینه‌ی تمام شده‌ی سازه را خیلی افزایش می‌دهد. به همین دلیل از روش‌های دیگر، که هزینه‌ی کمتری دارند، از قبیل: استفاده از میلگرد با پوشش اپوکسی، میلگرد فیبری و یا میلگرد با لوانیزه استفاده می‌شود. ولی هر کدام از آنها، معایب و مزایایی دارند، لذا نمی‌توان یکی از آنها را برای تمامی کاربردها

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۹/۱۱/۱۴۰۰، اصلاحیه ۲۲/۹/۱۴۰۱، پذیرش ۱۰/۱۱/۱۴۰۱.

استاد به این مقاله:

نوذری، حسین، ارمغانی، اسطو، رحمانی، کمال، و پیروتی، صابر، ۱۴۰۲. بررسی خوردگی میلگردهای خاص در سازه‌های بتُنی. مهندسی عمران شریف، ۳(۳۹)، صص. ۱۲۳-۱۳۰.

DOI:10.24200/J30.2023.59659.3064

جدول ۱. ترکیب شیمیایی میلگردهای پوشش دار اپوکسی.

HeatNo.	C	Mn	Si	P	S	Ceq	V
۲۰۱۱۴۰۹	۰/۲۸	۰/۷۴	۰/۱۸	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	۰/۴۴	۰/۰۰۳

شده است. نمونه‌های به کار رفته، میلگرد از جنس فولاد ساختمانی با اندازه‌های ۱۶، ۲۰، ۲۲، ۲۵، ۳۲، ۳۶، ۴۰ میلی‌متر بوده است، که به روش نورد گرم تولید و با خنک‌کننده‌ی سریع کنترل شده‌اند. همچنین میلگرد فولاد ساختمانی با پوشش اپوکسی و ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ استفاده شده است:

همچنین چند میلگرد تولید شده به روش فیبری در اندازه‌های ۸/۵۷، ۱۳/۴۱، ۱۴ برای پژوهش حاضر تهیه شده است، که در شکل‌های ۱ و ۲ تعدادی از آنها مشاهده می‌شوند.

برای هر کدام از نمونه‌ها، خواص مکانیکی، شامل: تنفس تسليم، استحکام نهایی، مقدار درصد از دیاد طول نسبی، نسبت استحکام نهایی به تنفس تسليم و همچنین نیروی وارد شده در نقطه‌ی شکست اندازه گرفته شده است.

در آزمایش‌های مذکور از ماشین آزمون کشش یونیورسال شکل ۳ و دستگاه لیزری جهت اندازه‌گیری ابعاد هندسی میلگرد شکل ۴ استفاده شده است. در

کلریدی، کربناته و همچنین محیط تحت کنترل بدون شرایط خورنده انجام شده است. نتایج به دست آمده نشانگر سرعت خوردگی خیلی بالا در محیط کلریدی بوده و در محیط ذکر شده، درصد وزنی از دست رفتی (خورد شده) میلگرد فولادی در حد خیلی بالا گزارش شده است.^[۱۸]

آخررا مواد مرکب ساخته شده از مواد فیبری در چسب زین پلیمری شناخته شده به نام کامپوزیتی (FRD) به عنوان جایگزینی برای فولاد پیش‌تنیده در بعضی سازه‌ها معروفی شده است، که به علت داشتن خواص غیرمعناطنایی و غیرخورنده‌ی آنها، به میلگردهای مذکور توجه خاص صورت گرفته است.^[۱۹] استفاده از میلگردهای خاص اشاره شده در اوآخر قرن بیست در آمریکا، کانادا و ژاپن شروع شده است.^[۲۰] استانداردهایی نیز برای مواد مذکور ایجاد شده است، که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره شده است:

- مؤسسه‌ی استاندارد کانادا برای طراحی پل‌ها، بزرگراه‌ها و سازه‌های بتُنی مسلح با میلگرد فیبری ICAN/SAS ۲۰۰۶

- گزارش شمعه‌های بتُنی مسلح میلگرد فیبری شماره‌ی ACI ۴۰-IRO ۶ سازه‌ی بتُنی مسلح (FRD) کمیته‌ی ACI-۴۰ انتستیتوی بتُن آمریکا؛

- راهنمای مشخصات طراحی برای GFRP بتُن مسلح برای عرضه‌ی سکوی پل‌ها (AASHTO GRP - ۱۲۰۰۹ AASHTO LRFD)؛

- مرجع رسمی حمل و نقل و بزرگراه‌های ایالت متحده‌ی آمریکا.

اندازه‌گیری سرعت خوردگی واقعی متناسب با شرایط سازه و محیط آن، نیازمند صرف زمان طولانی (حتی سال‌ها) است، ولی در شرایط آزمایشگاهی معمولاً از روش‌های تسریع شده و شبیه‌سازی رایانه‌یی استفاده می‌شود. در این راستا، موارد مهم عبارت‌اند از:

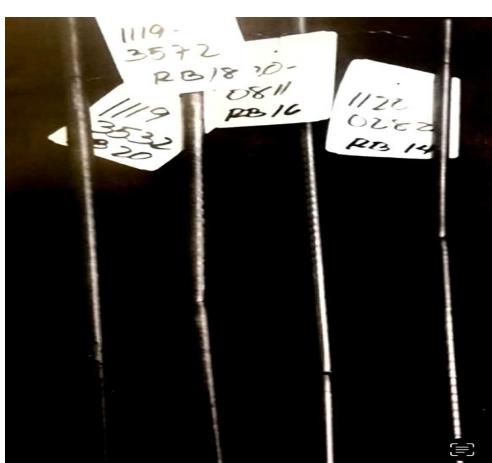
۱. شروع خوردگی

۲. سرعت خوردگی

۳. تأثیر خوردگی در دوام و استحکام میلگرد استفاده شده.



شکل ۱. نمونه‌هایی از میلگرد آجدار در اندازه‌های متفاوت برای آماده‌سازی برای آزمایش‌ها.



شکل ۲. نمونه‌ی میلگردهای استفاده شده برای انجام آزمایش‌های مکانیکی، که در آنها از دیاد طول نسبی ایجاد شده و شکست اتفاق افتاده است.

۲. آزمایش‌ها و روش پژوهش

در پژوهش حاضر، به کمک آزمایش‌های صورت گرفته، به مطالعه و بررسی تأثیر خوردگی ایجاد شده بر روی وزن و به عبارت دیگر، کاهش سطح مقطع و نهایتاً استحکام و دوام میلگرد به کار رفته شده در سازه‌ی بتُنی و افزایش عمر آن پرداخته



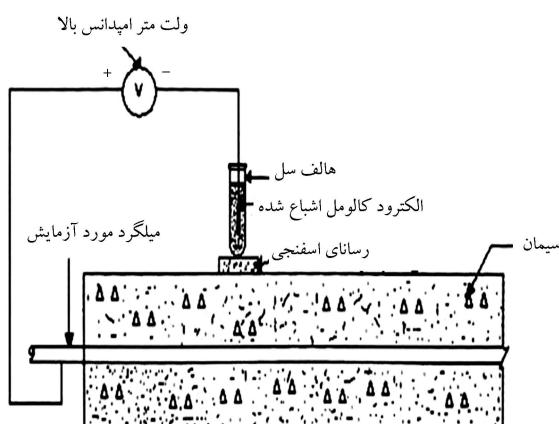
شکل ۵. اندازه‌گیری ازدیاد طول نسبی مناسب در نقطه‌ی شکست.



شکل ۶. دستگاه نشانه‌زنی میلگرد برای اندازه‌گیری و آماده‌سازی میلگرد برای آزمایش‌های کششی.



شکل ۷. دستگاه اندازه‌گیری خمش در میلگرد فیبری.



شکل ۸. اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز به روش هalf-Sl.



شکل ۳. دستگاه یونیورسال اندازه‌گیری خواص مکانیکی در حین انجام آزمون مکانیکی.



شکل ۴. دستگاه لیزری برای اندازه‌گیری ابعاد هندسی میلگرد آجرار.

شکل ۵، نیز نحوه‌ی اندازه‌گیری ازدیاد طول نسبی مناسب در نقطه‌ی شکست و در شکل‌های ۶ و ۷، دستگاه نشانه‌زنی میلگرد جهت اندازه‌گیری و آماده‌سازی برای آزمایش‌های کششی و همچنین دستگاه اندازه‌گیری خمش در میلگرد فیبری به ترتیب مشاهده می‌شوند.

۳. روش اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز (half-Sl)

تمایل فلزات به واکنش با محیط اطراف خود با مشخصه‌ی پتانسیل شناخته می‌شود، که این پتانسیل در تماس با محیط اطراف خود توسعه می‌یابد. در سازه‌ی پتنی مسلح، بتن به عنوان الکترولیت عمل می‌کند و میلگرد فولاادی به کار رفته شده، این پتانسیل را متناسب با محیط اطراف بتن توسعه می‌دهد، که این پتانسیل بسته به تغییرات محیطی متفاوت است. در شکل ۸، شماتیک اندازه‌گیری پتانسیل مدار مشاهده می‌شود.

اصل این روش مبتنی بر اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی میلگرد با توجه به الکترود استاندارد مرجع است. الکترود استاندارد مرجع، الکترودهایی از این قبیل هستند:

۱. الکترود استاندارد جیوه؛
۲. الکترود استاندارد مس و سولفات‌مس؛
۳. الکترود استاندارد نقره و کلریدنقره.

۴. نتایج

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده می‌توان به این نتیجه دست یافت که در صد تغییرات در بار در نقطه‌ی شکست میلگرد بیشتر از در صد تغییرات در سطح مقطع در اثر خوردگی بوده است، یعنی در صد تغییرات در دو متغیر مذکور مساوی و یا متعادل نیست. تغییراتی که استحکام در نقطه‌ی تسليم و استحکام نهایی در نقطه‌ی شکست پس از تغییر در قطر میلگرد ناشی از خوردگی دیده می‌شود، در بیشتر موارد

در جدول ۲، می‌توان تغییرات بار در نقطه‌ی شکست را نسبت به سطح مقطع تغییر یافته در اثر خوردگی برای کلیه‌ی اندازه‌های میلگرد آزمایش شده مشاهده کرد.

نتایج در ۴ مرحله (Rebar) ۱، Round ۲ و Round ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. اطلاعات تجمیعی نمونه‌های گرفته شده از سایز ۱۴ تا ۳۲ میلگرد.

اندازه میلگرد (mm)	شماره	WV (%)	قطر هسته (mm)	مساحت (mm ²)	تش تشیم (اسمی) (واقعی)	تش تشیم (اسمی) (اسمی)	تش تشیم (اسمی) (واقعی)	TS/YS	درصد تغییر طول	بار (kN)
۱۴	۱۱۲۰۰۲۸۲	-۰.۱	۱۲.۹۶	۱۳۶۴	۵۷۰	۵۴۱	۱۴۶.۰۱	۱.۲۷	۱۵	۱۰.۲۰
										۸۵.۰
										۷۶.۳
۱۶	۱۱۲۰۰۸۱۱	۰	۱۲.۶۲	۱۲۵.۰۲	۵۴۰	۵۴۰	۱۲۵.۰۲	۱.۲۷	۱۵	۶۹.۷
										۶۷.۵
										۶۸.۰
۱۸	۱۱۱۹۳۵۷۲	۰.۱	۱۴.۹۲	۱۴۹.۷۵	۵۵۴	۵۵۱	۱۹۱.۷۷	۱.۲۷	۱۵	۱۳۵.۸
										۱۲۱.۴
										۱۱۷.۱
۲۰	۱۱۱۹۳۵۳۲	۰.۱	۱۶.۸۰	۱۶۸.۷۱	۵۵۱	۵۵۰	۱۷۱.۹۵	۱.۲۷	۱۵	۱۱۴.۹
										۱۴۴.۰
										۱۴۲.۳
۲۲	۱۱۱۹۰۷۴۴	۰.۱	۱۸.۸۰	۱۸.۸۶	۵۴۷	۵۲۰	۲۹۸.۶۱	۱.۲۷	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۸.۸
۲۴	۱۱۱۹۰۷۵۰	۰.۱	۲۰.۹۰	۲۰.۹۰	۵۴۰	۵۴۰	۲۶۰.۶۰	۱.۲۷	۱۵	۱۷۳.۷
										۲۴۵.۴
										۲۰.۴۰
۲۶	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۱.۹۶	۲۱۲.۴۲	۵۰۵	۵۰۵	۲۱۲.۴۲	۱.۲۹	۱۵	۱۳۷.۹
										۱۴۷.۷
										۱۴۴.۹
۲۸	۱۱۱۹۰۷۵۰	۰.۱	۲۲.۸۰	۲۷۱.۵۸	۵۴۲	۵۴۲	۲۷۱.۵۸	۱.۲۷	۱۵	۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
										۱۷۲.۸
۳۲	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۳.۱۶	۲۱.۵۷	۴۹۳	۴۹۳	۳۶۵.۱۲	۱.۲۷	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۸.۸
۳۴	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۴.۲۳	۲۷.۳۹	۵۶۷	۵۶۷	۴۶۶.۰۹	۱.۲۷	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۳۶	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۴.۲۳	۲۶.۲۳	۵۶۸	۵۶۸	۴۰.۸۰.۷	۱.۲۷	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۳۸	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۵.۰۰	۲۲.۰۰	۵۶۰	۵۶۰	۳۷۹.۹۴	۱.۲۷	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۴۰	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۵.۵۰	۲۱.۵۳	۵۶۸	۵۶۸	۳۶۳.۸۸	۱.۲۹	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۴۲	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۶.۲۳	۲۷.۳۹	۵۶۷	۵۶۷	۴۰.۰۹	۱.۲۷	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۴۴	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۶.۲۳	۲۷.۳۹	۵۶۸	۵۶۸	۴۸۴.۳۷	۱.۲۹	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۴۶	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۶.۲۳	۲۷.۳۹	۵۶۸	۵۶۸	۴۶۶.۰۹	۱.۲۹	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷
۴۸	۱۱۱۹۰۷۷۸	۰.۱	۲۶.۲۳	۲۷.۳۹	۵۶۸	۵۶۸	۴۶۶.۰۹	۱.۲۹	۱۵	۲۰.۹
										۱۸۶.۳
										۱۷۳.۷

شده توسط میلگرد از $76/3$ KN به $69/7$ KN رسیده است، که معادل کاهاش $2/5$ % است. این نتایج را می‌توان در اندازه‌های دیگر هم که آزمایش شده‌اند، مشاهده کرد.

نتیجه‌ی دیگری که قابل ذکر بوده و بهوضوح در آزمایش‌ها مشاهده شده است، این است که در قسمت رویی میلگرد، کاهاش بیشتری دربار تحمل شده به وجود آمده و عملت آن استفاده از میلگرد تولید شده به وسیله‌ی نورده‌گرم و استفاده از عملیات ترمودینامیکی بوده است، که این عملیات حرارتی باعث تغییر در ساختار متالوژیکی میلگرد شده و لذا خواص مکانیکی آن با مرکز میلگرد متفاوت بوده است. در نتیجه در مهندسی سازه باید به فرایند تولید میلگرد توجه شود.

بدون انجام آزمایش‌های ذکر شده، نمی‌توان این نتایج را برای اندازه‌های مختلف مشاهده کرد. چون در صد کاهاش بار تحمل میلگرد با پیشرفت خوردگی در میلگردها متفاوت، یکسان نیست. لذا باید به خواص متالوژیکی میلگرد و فرایند تولید آن نیز توجه شود.

در شکل ۹، سطح مقطع شکست در میلگرد ساختمان فولادی و میلگرد فیبری مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که میلگرد فیبری، خیلی ترد و شکسته است و چون به صورت الیافی است، شکست در یک نقطه اتفاق نمی‌افتد و دیده می‌شود که چسب طلایی‌مانند که برای اتصال الیاف و همچنین برای شکل آج استفاده شده است، از میلگرد جدا شده و گیرایی بتن را کم کرده است.

باید توجه داشت که یکی از ضعف‌های اساسی میلگردهای فیبری، گیرش نامناسب آنها با بتن است و گسیختگی میلگرد از بتن را باعث می‌شود و این

کاهاشی است و عملت آن را می‌توان روش تولید میلگرد دانست. این یک نکته‌ی اساسی است که در هنگام طراحی باید به آن توجه شود. دلیل آن هم تغییرات در ساختار میلگرد است، که یکنواختی آن و میزان درصد فازهای تشکیل‌دهنده‌ی آن بسته به شرایط تولید میلگرد است و باید به آن توجه کرد.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، یادآور مشکل خوردگی در میلگرد و بروز اشکال اساسی برای سازه‌ی پتنی مسلح است. لذا خوردگی و محیط اطراف سازه‌ی پتنی باید به عنوان مورد اساسی در طراحی سازه مدنظر قرار گیرد. نتایج آزمایش‌های انجام شده برای انواع میلگردها و اندازه‌های مختلف را می‌توان به این صورت تشریح کرد:

۱. میلگرد 14 میلی‌متر: با $15/53$ % کاهاش در سطح مقطع در سه مرحله، بار تحمل آن مقدار $31/67$ % کاهاش یافته است؛

۲. میلگرد 16 میلی‌متر: با $14/66$ % کاهاش در سطح مقطع، بار تحمل آن $10/57$ % کاهاش یافته است؛

۳. میلگرد 18 میلی‌متر: با کاهاش $12/64$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $17/79$ % کاهاش یافته است؛

۴. میلگرد 20 میلی‌متر: با کاهاش $15/2$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $15/23$ % کاهاش یافته است؛

۵. میلگرد 22 میلی‌متر: با کاهاش $13/39$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $24/26$ % کاهاش یافته است؛

۶. میلگرد 25 میلی‌متر: با کاهاش $21/93$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $24/98$ % کاهاش یافته است؛

۷. میلگرد 28 میلی‌متر: با کاهاش $17/76$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $21/08$ % کاهاش یافته است؛

۸. میلگرد 32 میلی‌متر: با کاهاش $16/12$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $15/96$ % کاهاش یافته است؛

۹. میلگرد 36 میلی‌متر: با کاهاش $16/41$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $25/95$ % کاهاش یافته است؛

۱۰. میلگرد 40 میلی‌متر: با کاهاش $11/28$ % در سطح مقطع، بار تحمل آن $13/46$ % کاهاش داشته است؛

۱۱. میلگرد با پوشش اپوکسی: لایه‌ی اپوکسی میلگرد را در مقابل خوردگی تا زمانی که لایه‌ی محافظ از آن جدا نشده است، محافظت می‌کند. در صورتی که لایه‌ی اپوکسی معیوب شود و یا به هر دلیلی قسمت‌هایی از آن از روی سطح میلگرد جدا شود، خوردگی در آن نقطه و یا نقاط شروع می‌شود و نسبت به میلگرد معمولی، با سرعت بیشتری پیشرفت می‌کند. چون پدیده‌ی الکترولیز با سرعت و غلظت بیشتری در نقاط اشاره شده به طور متوجه اتفاق خواهد افتاد؛

۱۲. میلگرد تولید شده‌ی فیبری: در سازه‌های $8/57$ ، $13/41$ و 14 میلی‌متر خوردگی اتفاق نمی‌افتد.

یا به عبارتی دیگر در میلگرد سایز 14 میلی‌متر، با پیشرفت خوردگی به اندازه‌ی $68/0$ میلی‌متر، مقدار نیروی تحمل شده به میزان $16/7$ KN (از $10/2$ KN) 85 کاهاش داشته است. همچنین در مرحله‌ی بعدی با $62/0$ میلی‌متر پیشرفت خوردگی، مقدار نیروی تحمل شده از 85 KN به $76/3$ KN رسیده است (یعنی $10/2$ % کاهاش). در مرحله‌ی سوم با پیشرفت $96/0$ میلی‌متر، مقدار نیروی تحمل



شکل ۹. نحوه‌ی شکست در میلگرد معمولی و فیبری.



شکل ۱۰. نحوه‌ی شکست میلگرد فیبری.

جهت فرایند هیدراتاسیون (تقریباً ۳ روز)، مطابق استاندارد (دستورالعمل ۴۵۰) نشانه های خوب، خیلی محدود می سازد. سازمان مدیریت و برنامه ریزی نمونه از قالب چوبی خارج شد و پس از یک روز خشک شدن در محیط آزمایشگاه، در داخل ظرف حاوی آب دریا قرار گرفت. در شکل ۱۱، مراحل انجام آزمون خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن در نوشتار حاضر مشاهده می شود.

پس از گذشت ۲۲ ساعت از ریختن بتن در قالب ها، قالب های بتی باز شدند و نمونه ها درون ظرف های پلاستیکی، که از نمونه های آب پر شده بودند، قرار گرفتند تا برای آزمایش های ۷، ۲۸ و ۶۰ روزه آماده شوند. روش اندازه گیری پتانسیل خوردگی با استفاده از دستگاه آزمون غیرمخرب هالف سل با استاندارد ASTM ۸۷۶ انجام شده است.

همچنین جهت اندازه گیری پتانسیل خوردگی، یک ولت متر با مقاومت داخلی بالا نیاز است. برای این کار کافی است تا یک الکترود مرجع بر روی یک اسفنج خیس و بر روی سطح بتن قرار داده شود و آن را با یک سیم کم مقاومت به ولت متر متصل کرد. از سوی دیگر، باید با یک سیم کم مقاومت دیگر، آرماتور را به قطب دیگر ولت متر وصل کرد. پتانسیلی که ولت متر در این حالت نشان می دهد، پتانسیل خوردگی فولاد است. الکترود مرجع استفاده شده، دائماً باید با الکترود مرجع اولیه مقایسه شود و به هنگام استفاده در نگهداری آن دقت شود، که در غیر این صورت همهی نتایج زیر سوال خواهند رفت.

آزمایش هالف سل بر روی تمامی نمونه های ساخته شده انجام شده است. در ابتدا، تمامی نمونه ها که در شرایط آزمایشگاهی در داخل آب دریا به مدت ۷، ۲۸، ۴۰ و ۶۰ روز نگهداری شده بودند، تحت آزمایش هالف سل قرار گرفتند. همان طور که در شکل های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود، نحوه ای انجام آزمایش بدین گونه بود که در ابتدا یک سرسیم به میلگرد وصل و سر دیگر به کمک یک الکترود به سطح بتن مرطوب چسبانده شده و در این فاصله، ولت متری در مسیر قرار گرفته است. اختلاف پتانسیل بر روی صفحه نمایش دستگاه مشاهده شده و عدد مذکور یادداشت شد.

از بررسی کلی نمودار شکل ۱۲، ملاحظه می شود که در تمام نمودارهای میله بی مذکور، مقاومت میلگرد اپوکسی در مقایسه با میلگرد معمولی بسیار بیشتر بوده است. همچنین با گذشت زمان، بر میزان خوردگی میلگردها افزوده شده است، ولی باز هم میزان خوردگی در میلگردهای اپوکسی تقریباً نصف میلگردهای معمولی است. همچنین با بررسی نمودار شکل ۱۳ مشخص می شود که میزان نفوذ یون کلر و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی بتن با گذشت زمان بیشتر شده و نفوذ بیشتر یون کلر در مدت ۶۰ روز باعث شده است که میلگردها با شدت بیشتری خورده شوند. ولی باز هم مشاهده می شود که



شکل ۱۱. آماده سازی دستگاه هالف سل جهت انجام آزمون خوردگی.

عدم پیوستگی بتن، کاربرد آنها را علی رغم مقادیر از مزایای خوب، خیلی محدود می سازد.

مشکل اساسی تر میلگردهای فیبری، تردی و شکنندگی آنهاست، یعنی عدم شکل پذیری. نقطه ای شکست با نقطه ای تسیم آنها یکی است و تغییر شکل اتفاق نمی افتد، که برای استفاده در مناطق زلزله خیز خطرناک است و اصلاً توصیه نمی شود.

کاربرد این میلگردهای خاص به دلیل هزینه ای بالای تولید و خاصیت های ویژه فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها محدود و باسته به شرایط خاص است. لذا نمی توان به صرف داشتن مقاومت در مقابل خوردگی، جایگزین میلگرد معمولی در تمام شرایط کاری شوند. طراح سازه نیز با توجه به شرایط کاربردی، از قبیل: شرایط محیطی، ویژگی های سازه و صرفه جویی اقتصادی انتخاب میلگرد را انجام می دهد.

۵. بررسی تأثیر میلگرد اپوکسی در خوردگی بتن مسلح

با توجه به این که در پژوهش حاضر در نظر است راجع به میلگردهای اپوکسی شده در جا لوگیری از خوردگی بتن مسلح پرداخته شود، لذا در روش آزمایشگاهی حاضر با انتخاب میلگردهای مناسب جهت انجام آزمایش های خوردگی، سپس اپوکسی کردن آنها با توجه به ضوابط و استانداردهای مرتبط و سپس بررسی تأثیر نمونه ای آب دریا و سایر عوامل محیطی در میلگردهای اپوکسی و معمولی و ارزیابی تک تک میلگردهای مورد آزمایش و انتخاب کمترین و بیشترین میزان احتمال خوردگی با استفاده از آزمون های غیرمخرب به وسیله دستگاه هالف سل، با بررسی پارامترهای مختلف بر روی میلگردها از لحاظ عوامل خورنده محیطی و انتخاب پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارند، به چگونگی تأثیر پوشش اپوکسی استفاده شده می دارد. در جا لوگیری از خوردگی میلگردها پرداخته شده است.

۱.۵. مواد مورد نیاز جهت انجام آزمایش ها:

- قالب چوبی مکعبی به ابعاد $30 \times 30 \times 30$ cm.

- بتن با مقاومت ۲۸ روزه ای نمونه ای مکعبی $300 \times 300 \times 300$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع.

- میلگرد اپوکسی و معمولی به قطر ۱۲ میلی متر.

- نمونه ای آب دریا با PH برابر ۸ (محیط بازی).

- دستگاه الکترو مغناطیسی به نام الکومتر جهت اندازه گیری ضخامت روکش اپوکسی.

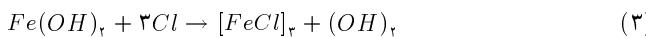
- دستگاه آزمون های غیرمخرب هالف سل با استاندارد ASTM ۸۷۶ دستگاه اولتراسونیک آزمون.

۲. روش انجام آزمایش هalf سل

آزمایش هalf سل با ساخت نمونه ای بتی براساس طرح اختلاط و قرار دادن میلگردهای اپوکسی و معمولی و گذشت ۷۲ ساعت از زمان بتن ریزی انجام می شود.

برای این منظور، ابتدا به ارتفاع ۱۵ سانتی متر از بتن تهیه شده در کف قالب ریخته و میلگردهای فولادی اپوکسی و معمولی در داخل قالب قرار داده شدند. سپس تا ارتفاع ۳۰ سانتی متر از بتن تهیه شده در داخل ظرف ریخته و برای آن که پس از ریختن بتن، فضاهای خالی کاملاً پر شوند، توسط یک تخلیق در قالب ضربه زده شده است تا بتنی با ترکیب همگن حاصل شود. افزایش مقاومت مکانیکی بتن و به خصوص مقاومت فشاری آن، تابعی از زمان است. پس از گذشت مدت زمان لازم

در بن، یون های هیدروژن بیشتری آزاد می شود، لذا اسیدیته افزایش می یابد و در نتیجه پتانسیل ها در ناحیه کاتدی، منفی تر می شوند. از این رو، با افزایش غلظت یون کلر و اکسیژن در دسترس، شدت جریان خوردگی افزایش می یابد. با کاهش مقدار PH و نفوذ بیشتر یون کلر، امکان وقوع واکنش شیمیایی مطابق رابطه ۳ افزایش می یابد:



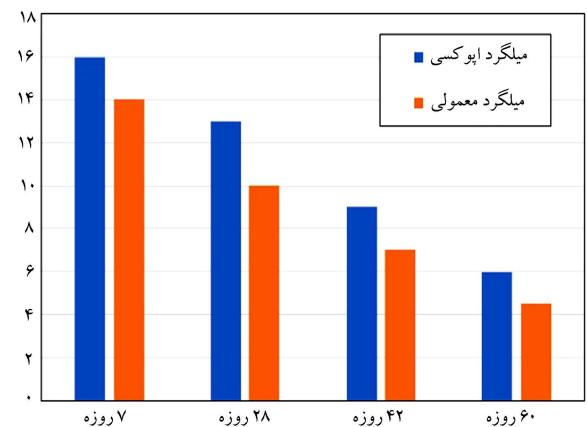
یون کلر در واکنش اخیر، نقش کاتالیزوری دارد. یون کلر با اکسید کردن آهن، یون مركب و ناپایدار $FeCl_2$ را تولید می کند، که در آب محلول است. با حل شدن یون $FeCl_2$ در آب و انجام واکنش با یون های هیدروکسید موجود در آب، $Fe(OH)_2$ تولید می شود. در اثر واکنش اخیر، یون Cl^- آزاد و آماده واکشن مجدد می شود. همچنین در اثر واکنش مذکور، یون های هیدروکسید مصرف و از قلیائیت بتن کاسته می شود. الکترون های تولید شده در اثر واکنش های شیمیایی از طریق میلگرد ها به نواحی کاتدی جریان می یابند. از این رو، در اثر تمرکز یون های کلر و کاهش موضعی PH، خوردگی ایجاد می شود و هیدروکسید آهن تولید شده با جذب اکسیژن، تولید ترکیب های $Fe(OH)_2$ ، Fe_2O_3 و Fe_3O_4 تولید می کند. این واکنش ها، منجر به افزایش میزان خوردگی و کاهش پتانسیل نیم پیل میلگردها می شود.

۶. نتیجه گیری

دوام میلگرد به کاررفته در یک سازه بتنی به منظور استفاده مطمئن و طولانی مدت آن سازه، اهمیت زیادی دارد و لذا به همین دلیل، ریشه و علت اصلی کاهش عمر و دوام آن سازه، که خوردگی است، اهمیت زیادی دارد. لذا خوردگی میلگرد فولادی، که ریشه اصلی مشکل مذکور است و از محیط خورنده ای طراف سازه ناشی می شود، باید بررسی شود و طراحان سازه به آن توجه کنند. خواص مکانیکی، اصلی ترین خاصیت میلگرد فولادی متأثر از خوردگی است، که آزمایش شده است. در اندازه گیری خواص مکانیکی به وسیله دستگاه یونیورسال بسته به نوع دستگاه، تغییرات جزئی مشاهده شده است. به عنوان مثال، در بعضی دستگاه ها، حد پایین تنش تسليیم و در بعضی از آنها، حد بالایی تنش تسليیم و در منحنی تنش - کرشن ثابت می شود. یادآوری می شود که حد بالا و پایین تنش تسليیم در اثر پدیده هی تشکیل باندهای لودر در فولاد است، که در مرز شروع تغییر شکل خمیری پس از تغییر شکل کشسان است و باید به آن توجه شود. به منظور اندازه گیری دقیق تر سطح مقطع میلگرد، برای آماده سازی میلگردها پس از خوردگی از ماشین کاری استفاده شده است. چون در اثر نفوذ خوردگی در مرز دانه ها برای اندازه گیری خواص مکانیکی، سطح مقطع دقیق در دسترس نیست. همچنین نتایج حاصل نشان داد که میزان خوردگی در میلگردهای فیبری تقریباً نصف میزان خوردگی در میلگردهای معمولی است، که نشانگر کارآیی میلگرد فیبری است. نتایج آزمایش هalf سل نیز نشان داد که میزان نفوذ یون کلر و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی بتن با گذشت زمان بیشتر شده است. همچنین، نفوذ بیشتر یون کلر در مدت ۶۰ روز باعث شده است که میلگردها با شدت بیشتری خوردگی شوند. ولی باز هم مشاهده شد که مقاومت الکتریکی در نمونه هایی که میلگرد اپوکسی داشتند، بیشتر بوده است؛ که نشان دهنده می باشد که اپوکسی در مقابل اکسیداسیون و خوردگی است.



شکل ۱۲. مقایسه خوردگی میلگردهای معمولی و اپوکسی در مجاورت آب دریا.



شکل ۱۳. مقایسه نفوذ یون کلر در نمونه بتنی همراه با میلگردهای معمولی و اپوکسی در مجاورت آب دریا.

مقاومت الکتریکی در نمونه هایی که میلگرد اپوکسی داشتند، بیشتر بوده است؛ که نشان دهنده مقاومت میلگردهای اپوکسی در مقابل اکسیداسیون و خوردگی است.

بن پیش از آن که کربناته شود، محیطی به شدت قلیائی دارد و PH آن در حدود ۱۳ است. علت این حد بالای قلیائیت، وجود هیدروکسیدهای کلسیم، پاتسیم و سدیم است، که از واکنش بین آب و سیمان تشکیل شده اند. در مراحل اولیه هیدراتاسیون، فیلم محافظه ای اکسیدی Fe_3O_4 به دلیل قلیائیت بالای محیط بن توسط یک واکنش الکتروشیمیایی شامل اکسیداسیون آهن و احیای کاتدی اکسیژن تشکیل می شود. اکسیژن مورد نظر همان اکسیژن موجود در خلل و فرج بن است. این لایه نازک در عمل قادر است به خوبی فلز را محافظت کند. لایه ای اکسید چسبنده آهن، ضخامتی در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۰۱ میکرون دارد. این ضخامت بستگی به قلیائیت بالای بن و پتانسیل فولاد دارد، که معمولاً بین ۲۰۰-۲۵۰ میلی ولت است. واکنش های تشکیل لایه ذکر شده، مطابق روابط ۱ و ۲ هستند:



نفوذ بیشتر یون های کلر به نواحی آندی، موجب اسیدی تر شدن نواحی آندی و قلیائی تر شدن نواحی کاتدی می شود. با پیشرفت خوردگی و هیدرولیز محصولات خوردگی

منابع (References)

1. Duong, V.B., Sahamit R., Mongol, T. and Tangter et al., 2013. Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement based materials. *Construction and Building Materials*, 40, pp.1066-1075. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.042.
2. Soleymani, H.R. and Ismail, M.E., 2004. Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens. *Cem. Concr. Res.*, 34(11), pp.2037-2044. DOI:10.1016/j.cemconres.2004.03.008.
3. Elsener B., Molina, M. and Bonhi, H., 1993. *Carras. Sci*, 35, p.1563.
4. Elsener, B., Bonhi, H., Berke, N.S. and et al., 1990. *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, Philadelphia, USA, p.143.
5. Broomfield, J.P., Langford, P.E., Ewins, A.J. and et al., 1990. Corrosion rates of steel in concrete. ASTM STP 1065, Philadelphia, USA, p.157.
6. Fnina, A. and Bayle-Boding, F., 2003. Assessment of deteriorated concrete cover by high frequency ultrasonic naces. *International Symposium on (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, pp.15-20 Berlin, Germany.
7. Hato, Y. and et al., 2003. Prediction of the resistance performance of the substance movement by using ther-
8. Law, D.W. and Cairns J.J., 2003. Evaluation of corrosion loss of steel reinforcing bars in concrete using linear polarisation resistance measurement. International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp.48-54 Berlin, Germany.
9. Soutsos, M.N., Bungey, J.H. and Millard, S.G., 2009. Current research on sustainable construction products at the university of liverpool. *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, Oran: ENSET.
10. ACI Committee 318-2005., 2005. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (318-05). *American concrete Institute, Farmington Hills*, Mich p.1430.
11. Sorensen, H.E. and Frolund, T., 2002. Monitoring of reinforcement corrosion in marine concrete structures by the galvanostatic pulse method. *Proceedings International Conference on Concrete in Marine Environment*, Hanoi, Vietnam.
12. Wang, X. and Liu, X., 2015. Bond strength modeling for corroded reinforcement of corrosion and pitting factor of steel in corroded rc beams. *Construction and Building Material*, 95, pp.231-248. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.015.