

# اثر کیفیت‌های متفاوت پیمانه‌های بتن در یک عضو بتن مسلح بر خوردگی آرماتور

پرویز قدوسی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

parvizhoddousi@yahoo.com

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۳)

**چکیده** - اثر تفاوت در کیفیت بتن اعضای بتن مسلح در مدت آغاز خوردگی و شدت خوردگی در این پژوهش بررسی شده است. برای ارزیابی اثر کیفیت ناهمگن، دو نوع نمونه دال و ستون از نظر پتانسیل خوردگی اندازه گیری شد. همچنین شدت خوردگی و مقاومت ویژه (مقاومت الکتریکی) بررسی شد. برای ایجاد اختلاف در کیفیت بتن در اعضای بتن آرمه، از نسبت‌های مختلف آب به سیمان استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تفاوت در کیفیت بتن در بخش‌های مختلف یک عضو بتن مسلح می‌تواند سبب افزایش شدت خوردگی و کاهش مدت شروع خوردگی شود. تفاوت در کیفیت بتن، به دلیل تفاوت در مقاومت ویژه و در نتیجه اختلاف پتانسیل بین دو بخش بتن ایجاد و در نتیجه خوردگی آغاز می‌شود. امتداد بتن‌ریزی و امتداد آرماتور (امتدادهای افقی و عمودی) در مدت شروع خوردگی و اختلاف پتانسیل بین دو بخش از نمونه مؤثر است. مدت زمان لازم برای شروع خوردگی در ستون‌ها کمتر از دال‌ها است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که استفاده از دوده سیلیس بدون تغییر کیفیت در عضو بتن آرمه، به افزایش مدت شروع خوردگی می‌انجامد.

**کلید واژگان:** خوردگی آرماتور، تفاوت در کیفیت بتن، مقاومت الکتریکی.

## ۱- مقدمه

آنکه فرایند خوردگی آغاز شود و ادامه یابد، عوامل متعددی مانند وجود یون‌های کلرید، نفوذ اکسیژن، وجود رطوبت و اختلاف الکتروپتانسیل بر سطح میلگرد، دخالت دارند. اختلاف الکتروپتانسیل بر سطح میلگرد برای ایجاد مناطق آند و کاتد اهمیت دارد. این اختلاف پتانسیل ناشی از عوامل متعددی است. برای مثال ناهمگنی بتن و اختلاف آلیاژ فولاد در بخش‌های مختلف عضو بتن آرمه، می‌توانند سبب اختلاف در پتانسیل شوند. اختلاف الکتروپتانسیل در پدیده خوردگی بی‌اثر است، مگر آنکه

خوردگی آرماتور در بتن فرایندی الکتروشیمیایی است که در آن پیل‌های خوردگی بر روی سطح فولاد تشکیل می‌شود. پیل خوردگی شامل دو واکنش آندی و کاتدی است. در واکنش آندی فولاد به یون‌های فروز و الکترون تجزیه می‌شود (اکسیداسیون) و در واکنش کاتدی، الکترون، آب و اکسیژن ترکیب شده و یون‌های هیدروکسید را تشکیل می‌دهند [۱]. به طور کلی برای

عضو سازه‌ای، اهمیت بیشتری می‌یابد؛ زیرا معمولاً بخش تعمیر، شده از تخلخل و نفوذپذیری کمتری برخوردار است. در نتیجه سطح تعمیری از بخش‌های مجاور ایزوله شده و اختلاف پتانسیل بین محل‌های مختلف عضو ایجاد می‌شود [۶، ۷، ۸، ۹].

در این پروژه، نمونه‌های بتن آرمه ساخته شد که هر نمونه، از دو نوع بتن با کیفیت متفاوت تشکیل شده است. پس از قرار دادن نمونه‌ها در معرض یون‌های کلرید، رفتار آنها از نظر پتانسیل خوردگی، مقاومت ویژه و شدت خوردگی بررسی شده است.

## ۲- ساخت نمونه‌ها و برنامه

### آزمایشگاهی

#### ۲-۱- مواد مصرفی

سیمان مصرفی در ساخت نمونه‌ها از نوع ۲ پرتلند بوده است و در بعضی نمونه‌ها از دوده سیلیس به عنوان پوزولان استفاده شده است. دانه‌بندی شن و ماسه بر طبق استاندارد BS 882 انتخاب شد. دانه‌بندی ماسه در محدود منطقه ۱ استاندارد مذکور قرار دارد.

#### ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای انجام آزمایشها ۴ نوع نمونه به شرح زیر ساخته شد.

##### • ستون‌ها :

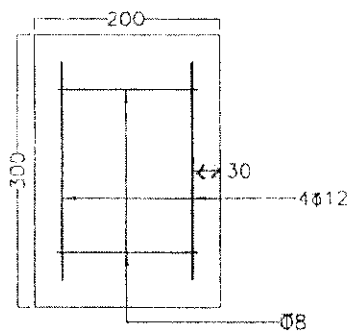
نمونه‌هایی با سطح مقطع  $200 \times 200$  میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر برای شبیه‌سازی رفتار اختلاف کیفیت بتن در ستون‌ها ساخته شد. هر ستون دارای دو بخش تحتانی و فوقانی است که هر بخش از یک نوع بتن بر طبق بند ۳-۳ ساخته شده است. ستون‌ها به صورت مسلح ساخته شد که دارای میلگردهای عمودی و خاموت هستند. جزئیات ستون‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. میلگردها با قطر ۱۲ میلیمتر انتخاب شد. پوشش بتنی بر روی میلگردها ۳۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

رسانای مناسبی برای جریان یون‌ها مهیا باشد. بتن به صورت الکترولیت و رسانا برای عبور جریان خوردگی عمل می‌کند. بخصوص اگر یون‌های کلرید در منافذ موجود باشند، مقاومت الکتریکی بتن کاهش می‌یابد و رسانای مناسبی برای حرکت یون‌ها خواهد بود [۲، ۳].

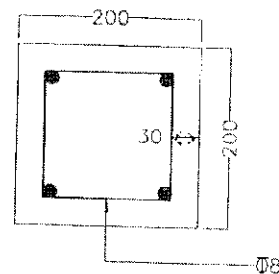
مهمترین عواملی که عملکرد بتن را در محیط کلریدی تحت تأثیر قرار می‌دهند و نقش مهمی در کنترل روند نفوذ کلرید دارند، عبارتند از شامل میکرو ساختار بتن، شیمی بتن و شرایط محیطی [۴، ۵]. دو عامل ساختار و شیمی بتن نه فقط در نفوذ کلریدها نقش مهمی دارند، بلکه خود، سبب ناهمگنی در بتن و در نتیجه اختلاف پتانسیل می‌شوند.

کیفیت میکروساختار بتن، تحت تأثیر کمیت و نوع سیمان و مقدار آب در مخلوط است. همچنین استفاده از مواد افزودنی معدنی مانند پوزولان‌ها می‌تواند در تغییر میکروساختار بتن مؤثر باشد.

مقاومت ویژه بتن نشان‌دهنده ساختار و شیمی بتن است. بنابراین اندازه‌گیری مقاومت ویژه به چند دلیل اهمیت بسزایی دارد. برای تعیین نایکخواختی در کیفیت بتن، مقاومت ویژه تنها خاصیتی است که تابع ساختار و شیمی بتن است و ناهمگنی را به صورت مؤثر نشان می‌دهد. همچنین اختلاف در مقاومت ویژه، خود سبب اختلاف در نفوذ عناصر مخرب مانند کلریدها و اکسیژن شده و در نتیجه اختلاف پتانسیل به وجود می‌آید. به طور کلی، بتن‌ریزی هر عضو سازه‌ای در چند مرحله انجام می‌شود و احتمال تغییر در کیفیت بتن در بخش‌های مختلف عضو سازه‌ای وجود دارد. این اختلاف کیفیت بتن سبب ایجاد دو محل متفاوت در عضو شده و در نتیجه احتمال به وجود آمدن آند و کاتد افزایش می‌یابد. این پدیده - که بر اثر آن اختلاف پتانسیل بین دو محل در عضو افزایش می‌یابد - موجب تشدید شدت خوردگی می‌شود. پدیده اختلاف پتانسیل در بخش‌های تعمیر شده



ب - مقطع طولی

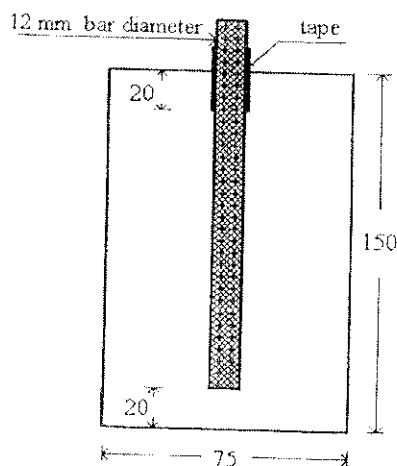


الف - مقطع عرضی

شکل ۱ ابعاد نمونه‌های ستون و جزئیات آرماتور بندی (ابعاد به میلی‌متر)

### • استوانه‌ها

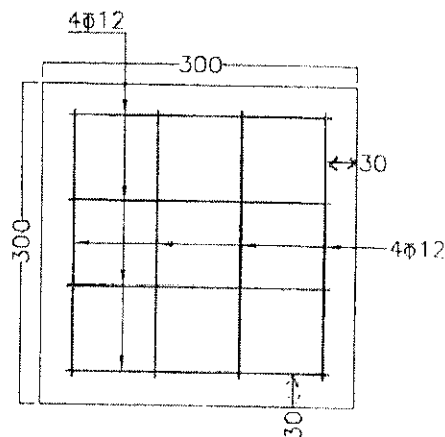
برای اندازه‌گیری شدت خوردگی از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر و به ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. در وسط این نمونه‌ها یک میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر قرار داده شد به نحوی که میلگرد از پایین نمونه ۲۰ میلی‌متر فاصله داشته باشد (شکل ۳). برای ساخت استوانه‌ها مانند ستون‌ها و دال‌ها از دو نوع بتن استفاده شد. نسبت مخلوط بتن‌ها در هر نمونه استوانه‌ای بر طبق با جدول ۱ است.



شکل ۳ نمونه استوانه‌ای برای اندازه‌گیری شدت خوردگی (اندازه‌ها به میلی‌متر)

### • دال‌ها

نمونه‌هایی با سطح  $30 \times 30$  سانتیمتر و ارتفاع ۶ سانتیمتر برای شبیه‌سازی رفتار اختلاف کیفیت بتن در دال‌ها ساخته شد. هر دال از ۲ نوع بتن مجاور یکدیگر ساخته شده است. جزئیات مخلوط بتن در بند ۲-۳ ارائه شده است. دال‌ها به صورت مسلح ساخته شد که دارای میلگردهایی در دو امتداد عمود بر یکدیگر هستند. جزئیات دال‌ها در شکل ۲ ارائه شده و میلگردها با قطر ۱۲ میلی‌متر انتخاب شد.



شکل ۲ ابعاد نمونه‌های دال و جزئیات آرماتور بندی

مقداری از سیمان با دوده سیلیس یا اختلاف در مقدار سیمان، استفاده شده است.

## ۲-۴- عمل آوری و شرایط در معرض قرارگیری

تمامی نمونه‌ها به مدت یک روز در قالب قرار داشتند که در این مدت با استفاده از چتایی خیس و ورق پلاستیک عمل آوری شدند و یک روز پس از قالب برداری به مدت ۶ روز با استفاده از روش مذکور عمل آوری شدند.

سپس نمونه‌های ستون، دال و مکعبی هر روز در دو نوبت صبح و عصر با اسپری محلول نمک NaCl (غلظت ۵ درصد) در معرض نفوذ یون‌های کلرید قرار گرفتند. نمونه‌های استوانه‌ای در مخزن محلول نمک به صورت مغروق کامل (کل ارتفاع) قرار داده شدند.

## • نمونه‌های مکعبی

نمونه‌های مکعبی بتنی (بدون آرماتور) به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتیمتر ساخته شد. نمونه‌های مکعبی به دو سری تقسیم شد: تعدادی یکسری برای آزمایش مقاومت فشاری و تعدادی برای آزمایش مقاومت ویژه استفاده شد.

## ۲-۳- نسبت مخلوط‌ها

نسبت مخلوط‌ها در جدول ۱ آورده شده است. منظور از بخش در جدول مذکور، دو بخش با کیفیت متفاوت بتن است که این دو بخش در نمونه‌های ستون به صورت عمودی و در نمونه‌های یک دال به صورت افقی اجرا شده است، در نمونه‌های OL و ML - که نمونه‌های شاهد هستند - هر دو بخش بتن از یک نوع کیفیت بتن ساخته شده است. برای ایجاد تفاوت کیفیت بین دو بخش یک نمونه با تغییر در نسبت آب به سیمان یا جایگزینی

جدول ۱ نسبت مخلوط‌ها و مقدار اسلامپ

معرف نمونه	بخش	سیمان $kg/m^3$	دوده سیلیس $kg/m^3$	شن $kg/m^3$	ماسه $kg/m^3$	نسبت آب به سیمان	اسلامپ mm
OL	۱	۳۵۰	-	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۰
	۲	۳۵۰	-	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۵
OH	۱	۳۵۰	-	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۰
	۲	۳۵۰	-	۹۹۰	۹۹۰	۰/۶۷	۱۲۰
ML	۱	۳۱۵	۳۵	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۵۵
	۲	۳۱۵	۳۵	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۰
MH	۱	۳۱۵	۳۵	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۰
	۲	۳۱۵	۳۵	۹۹۰	۹۹۰	۰/۶۷	۱۰۰
OML	۱	۳۵۰	-	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۵
	۲	۳۱۵	۳۵	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۴۰
R	۱	۳۵۰	-	۹۹۰	۹۹۰	۰/۵۶	۶۰
	۲	۴۰۵	۴۵	۹۶۵	۹۶۵	۰/۴۹	۴۰

## ۲-۵- آزمایش‌ها

آزمایشهایی که بر روی نمونه‌ها انجام شده است، در جدول ۲ ارائه شده است.

### • آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با استفاده از جک فشاری ۲۰۰ کیلونیونی انجام شد. نمونه‌های مکعبی پس از مدت عمل‌آوری با اسپری محلول کمک روزانه در معرض یون‌های کلرید قرار داشتند و سپس در سن ۲۸ روزگی آزمایش شدند.

### • آزمایش پتانسیل خوردگی

آزمایش پتانسیل خوردگی با استفاده از الکتروود مرجع کالومل اشباع انجام شد. بر اساس استاندارد ASTM C860 چنانچه پتانسیل میلگردها بیشتر از ۲۷۰- میلی ولت باشد، به معنای فعال بودن آرماتور از

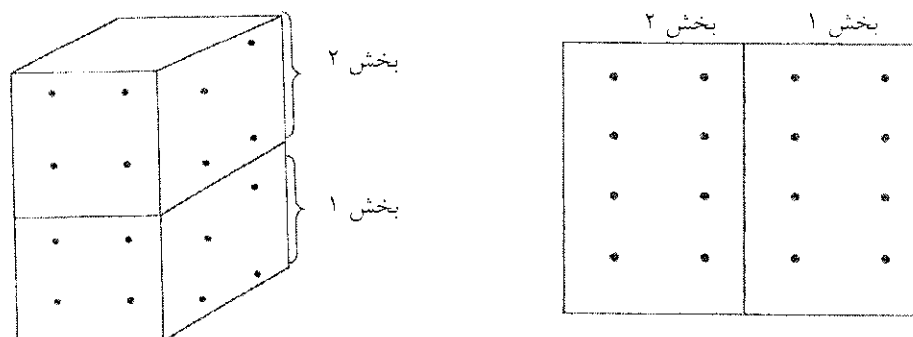
نظر خوردگی است. برای آزمایش پتانسیل خوردگی ستون‌ها و دال‌ها، نقاط ثابت بر سطح نمونه‌ها انتخاب و هفته‌ای یکبار پتانسیل خوردگی قرائت شد. نقاط ثابت در شکل ۴ نشان داده شده است.

### • آزمایش مقاومت ویژه و مقاومت اهمی

مقاومت اهمی نمونه‌های مکعبی هفته‌ای یکبار قرائت و با استفاده از رابطه آن، مقاومت ویژه محاسبه شد. اندازه‌گیری مقاومت اهمی مکعب‌ها، از دو ورق برنجی که با استفاده از خمیر سیمان در دو طرف مقابل مکعب قرار داده می‌شد، انجام شد. برای اندازه‌گیری مقاومت اهمی استوانه‌های مسلح، با قرار دادن یک ورق برنجی در مخزن محلول نمک انجام شد. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت اهمی در دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۷۸ ساخته شده است.

جدول ۲ نوع آزمایش‌ها

نوع نمونه	کیفیت بتن	نوع آزمایش
ستون	با دو کیفیت متفاوت	پتانسیل خوردگی
دال	با دو کیفیت متفاوت	پتانسیل خوردگی
مکعبی	با یک کیفیت	مقاومت ویژه
مکعبی	با یک کیفیت	مقاومت فشاری
استوانه	با دو کیفیت مختلف	شدت خوردگی



شکل ۴ نقاط ثابت در دال‌ها و ستون‌ها برای اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی

### • آزمایش اندازه گیری شدت خوردگی

برای اندازه گیری شدت خوردگی از پتانسیوستات<sup>۱</sup> استفاده شد. اصولاً پتانسیوستات دارای برق مستقیم DC و سه ترمینال یا سیم اتصال است. یکی از ترمینال‌ها برای اتصال به میلگرد یا الکتروود کار<sup>۲</sup>، ترمینال دیگر برای اتصال به الکتروود مرجع و سومین ترمینال برای اتصال به یک صفحه فولادی یا میلگرد خارجی با نام الکتروود ثانوی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. پتانسیل خوردگی ( $E_{cor}$ ) الکتروود کار نسبت به الکتروود مرجع یا الکتروود کالومل اشباع (SCE) و جریان برق یا خوردگی بین الکتروود کار و الکتروود ثانوی اندازه گیری می‌شود. شرح آزمایش به‌طور کامل در [۹] ارائه شده است. برای اندازه گیری شدت خوردگی از نمونه‌های استوانه‌ای (شکل ۳) استفاده شد.

### ۳- نتایج و تفسیر

تمام نتایج به‌دست آمده، میانگین نتایج دو نمونه است.

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن‌ها در سن ۲۸ روزگی بر اساس نمونه‌های مکعبی در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۵۶ دارای مقاومت بیشتر از بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۷۷ است. استفاده از دوده سیلیس در نمونه‌های ML موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری شده است. بیشترین مقاومت فشاری متعلق به نمونه R، بخش ۲ است که مقدار سیمان و دوده سیلیس به  $450 \text{ kg/m}^3$  افزایش داده شده است و نسبت آب به سیمان ۰/۴۹ است.

#### ۳-۲- مقاومت ویژه

مقاومت ویژه بتن‌ها در سنین مختلف تا ۱۲ هفتگی در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل برای معرفی بتن‌ها از معرف نمونه‌ها (حروف) برطبق جدول ۱ و معرف بخش (عدد) استفاده شده است. برای مثال OL-۲ به معنای نمونه OL و بتن بخش ۲ است. کمترین مقاومت ویژه متعلق به OH-۲ بتن معمولی بدون دوده سیلیس با نسبت آب به سیمان است که مقدار آن در هفته دوازدهم به  $395 \Omega \cdot m$  رسیده است. در تمام نمونه‌ها وجود دوده سیلیس سبب افزایش مقاومت ویژه در نمونه‌ها شده است. نتایج مقاومت ویژه با نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها تطابق دارد و نشان می‌دهد که مقاومت ویژه مانند مقاومت فشاری تابع تخریل و کیفیت وجه مشترک سنگدانه و خمیر سیمان است.

#### ۳-۳- پتانسیل خوردگی

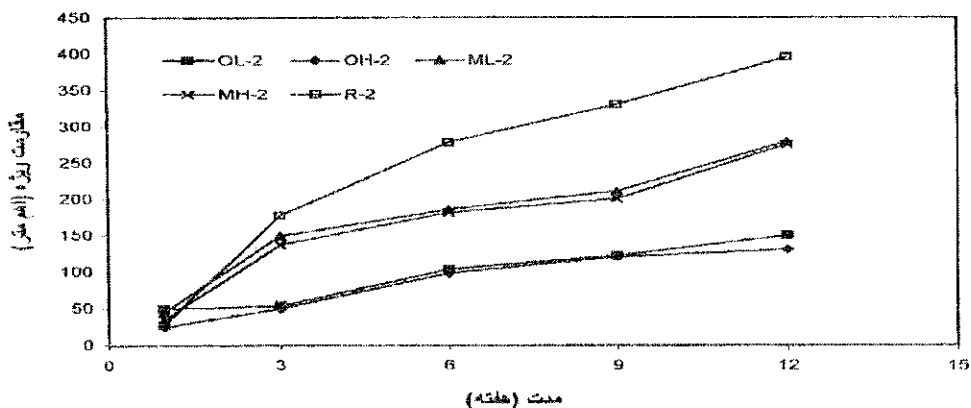
##### الف - ستون‌ها

پتانسیل خوردگی نمونه‌ها به شکل ستون در شکل ۶ نشان داده شده است. هر پتانسیل خوردگی، میانگین قرائت ۱۶ نقطه بر روی ستون شامل ۸ قرائت در بخش ۱ و ۸ قرائت در بخش ۲ است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، مقدار پتانسیل نمونه بتن معمولی (OL) یا نسبت آب به سیمان یکسان (۰/۵۶) در هر دو بخش، از هفته سوم فعال شده است. در نمونه بتن معمولی OH که در بخش ۲ نسبت آب به سیمان بیشتر از بخش ۱ است، تقریباً در نیمه هفته سوم خوردگی فعال شده است. به عبارت دیگر از نظر زمان فعال شدن آرما تور در هر دو نمونه OL و OH مشابه است و تغییر نسبت آب به سیمان در زمان شروع خوردگی چندان نقشی ندارد. اما مقادیر پتانسیل خوردگی در هفته‌های نظیر در نمونه OH بیشتر از نمونه OL است. در نمونه بتن با دوده سیلیس (ML) که هر دو

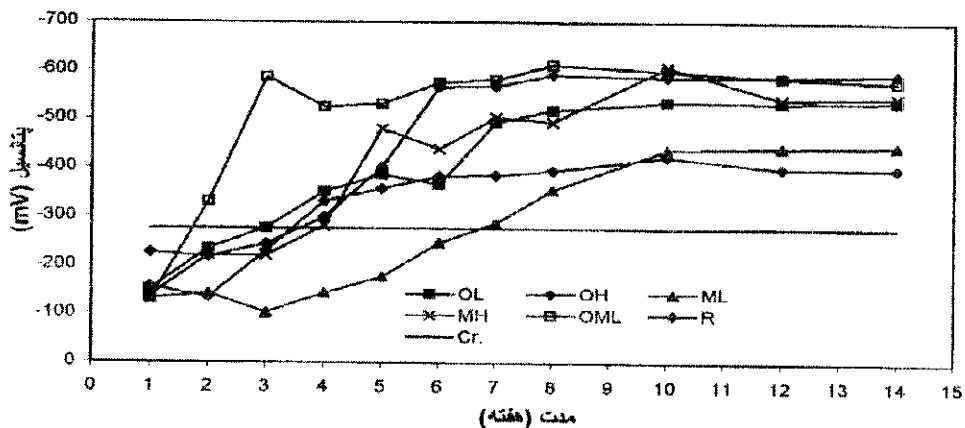
1. Potentiostat  
2. Working electrode  
3. Counter electrode

جدول ۲ مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزگی

مقاومت فشاری Mpa	نسبت آب به سیمان	دوده سیلیس	بخش	معرف نمونه
۲۳/۵	۰/۵۶	بدون دوده سیلیس	۱	OL
۲۳/۵	۰/۵۶	بدون دوده سیلیس	۲	
۲۳/۵	۰/۵۶	بدون دوده سیلیس	۱	OH
۱۷/۰	۰/۶۷	بدون دوده سیلیس	۲	
۲۷/۰	۰/۵۶	با دوده سیلیس	۱	ML
۲۷/۰	۰/۵۶	با دوده سیلیس	۲	
۲۷/۰	۰/۵۶	با دوده سیلیس	۱	MH
۲۶/۰	۰/۶۷	با دوده سیلیس	۲	
۲۳/۵	۰/۵۶	بدون دوده سیلیس	۱	R
۲۹/۵	۰/۴۹	با دوده سیلیس	۲	



شکل ۵ مقاومت ویژه بتن‌ها در سنین مختلف



شکل ۶ پتانسیل خوردگی ستون‌ها در سنین مختلف

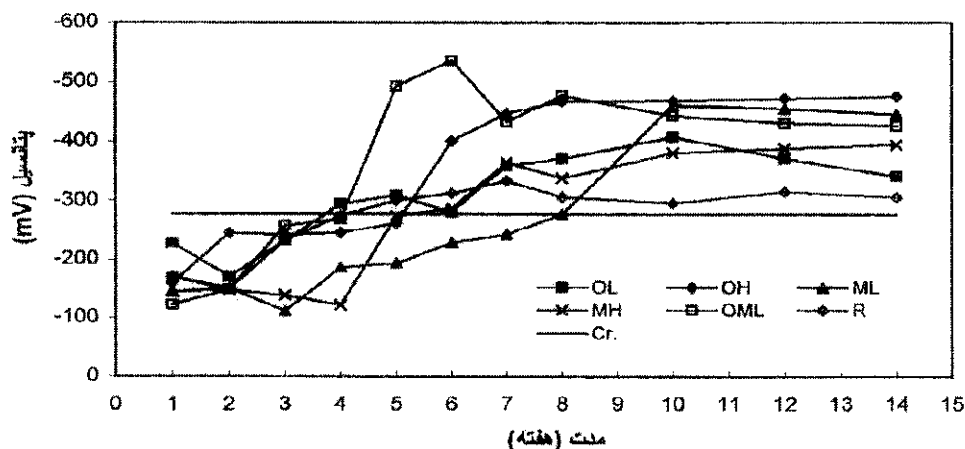
وجود دوده سیلیس در بخشی از عضو بتن آرمه، سبب کاهش شدید مدت آغاز خوردگی می‌شود. در نمونه R که شیشه‌سازی کارهای تعمیراتی است، وجود دوده سیلیس و مقدار سیمان در حد زیاد  $450 \text{ kg/m}^3$  در یک بخش و وجود بتن معمولی با سیمان پرتلند معمولی و نسبت زیاد آب به سیمان در بخش دیگر، سبب کاهش شدید مدت خوردگی شده است و در هفته حدود چهارم، پتانسیل فعال نشان داده است.

### ب- دال‌ها

نتایج پتانسیل خوردگی دال‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. تمام نتایج مشابه ستون‌ها است، تفاوت در نتیجه دال‌ها با ستون‌ها فقط تأخیر در مدت شروع خوردگی در تمام نمونه‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر مدت آغاز خوردگی در دال‌ها، یک هفته تا دو هفته بیشتر از ستون‌ها در تمام نمونه‌های نظیر است. این نتایج با یافته ارائه شده توسط محمد و همکاران او [۹] مطابقت دارد. این یافته نشان می‌دهد که امتداد آرماتور و ارتفاع بتن‌ریزی در خوردگی اثر قابل توجهی دارند. در این پژوهش شروع خوردگی آرماتور در ستون‌ها زودتر از دال‌ها بوده است.

بخش بتن دارای نسبت آب به سیمان یکسان هستند، شروع فعالیت خوردگی در هفته هفتم بوده است. به عبارت دیگر شروع خوردگی نمونه ML دیرتر از نمونه‌های بدون دوده سیلیس OL و OH است. در نتیجه، وجود دوده سیلیس سبب تأخیر در شروع خوردگی شده است. همچنین مقادیر پتانسیل خوردگی نمونه ML در هفته‌های نظیر کمتر از نمونه OL و OH است و این روند حتی در هفته‌های پس از شروع خوردگی صادق است. در نمونه حاوی دوده سیلیس MH - که نسبت آب به سیمان در دو بخش متفاوت است - شروع خوردگی در زمان کوتاه‌تر از نمونه ML بوده و زمان آغاز خوردگی در هفته چهارم است. این نتیجه نشان می‌دهد که در نمونه‌های دوده سیلیس دار، تغییر در نسبت آب به سیمان در بخش‌های مختلف، سبب کاهش شدید مدت شروع خوردگی می‌شود. مقادیر پتانسیل در هفته‌های بعد از فعال شدن در نمونه MH بیشتر از نمونه ML است.

در نمونه OML که یک بخش آن بدون دوده سیلیس و بخش دیگر دارای دوده سیلیس است، در هفته دوم پتانسیل خوردگی فعال نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، OML کوتاهترین مدت شروع خوردگی را داشته است. این نتیجه به این مفهوم است که



شکل ۷ پتانسیل خوردگی دال‌ها در سنین مختلف



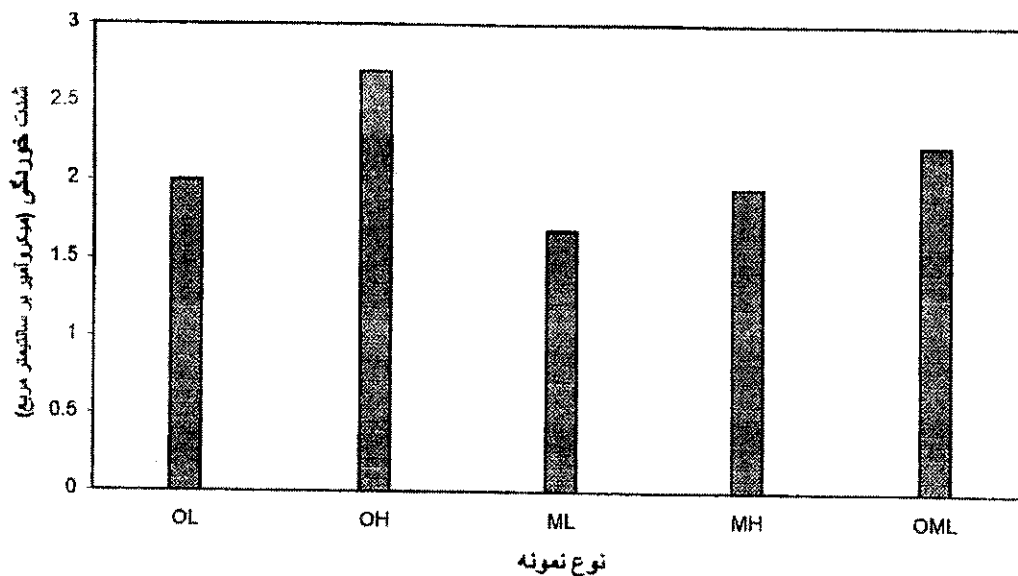
### ۳-۴- شدت خوردگی

شدت خوردگی نمونه‌های استوانه‌ای در سن هفتمه دوازدهم در نمودار ۸ نشان داده شده است. همانطور که شکل نشان می‌دهد، بیشترین شدت خوردگی مربوط به نمونه OH است که مقدار آن به  $2/70 \frac{\mu A}{cm}$  می‌رسد، که این شدت خوردگی را نمونه حاوی دوده سیلیس ML نشان داد که مقدار آن  $1/68 \frac{\mu A}{cm}$  است. مقایسه نمونه‌های OL و OH نشان می‌دهد که در صورت تغییر نسبت آب به سیمان می‌تواند بر افزایش شدت خوردگی نقش مؤثری داشته باشد. اما تغییر در نسبت آب به سیمان در بتن حاوی دوده سیلیس (مقایسه بین نمونه‌های ML و MH) سبب افزایش شدت خوردگی به مقدار کمتر از نمونه OH شده است. بررسی نتایج بتن با دو بخش کاملاً متفاوت از نظر استفاده از دوده سیلیس و بدون دوده سیلیس (OML) نشان می‌دهد که این نوع بتن به دلیل کیفیت کاملاً ناهمگن در افزایش شدت خوردگی

بسیار مؤثر است. مقایسه بین نمونه OML و OL نشان می‌دهد که استفاده از دوده سیلیس در بخشی از عضو بتن آرمه، مقدار شدت خوردگی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد و حتی از عضو بتن آرمه ساخته شده از بتن معمولی (بدون دوده سیلیس) شدت خوردگی بیشتر می‌شود.

### ۴- ارتباط بین نتایج

به‌طور کلی، نایکنواختی کیفیت بتن در مقاومت ویژه منعکس می‌شود. زیرا مقاومت ویژه تابع ساختار فیزیکی (تخلخل) و ساختار شیمیایی (رطوبت و یون‌ها در منافذ) بتن است. در جدول ۳ اختلاف مقاومت ویژه دو بخش هر یک از نمونه‌ها و شدت خوردگی مقایسه شده است. همچنین در جدول ۳، زمان شروع خوردگی هر یک از نمونه‌ها (ستون‌ها) آورده شده است. مقاومت ویژه و شدت خوردگی نشان داده شده در جدول، مربوط به سن ۱۲ هفتگی است.



شکل ۸ شدت خوردگی نمونه‌ها در هفته دوازدهم

جدول ۳ مقایسه نتایج مقاومت ویژه، شدت خوردگی و زمان آغاز خوردگی

نوع نمونه	اختلاف مقاومت ویژه بین دو بخش نمونه ( $\Omega - m$ )	شدت خوردگی ( $\mu A/cm^2$ )	زمان شروع خوردگی (هفته)
OL	* .	۲/۰۰	سوم
OH	۱۹۴	۲/۷۰	سوم
ML	* .	۱/۶۸	هفتم
MH	۴۰	۱/۹۵	چهارم
OML	۱۲۹۶	۲/۲۳	دوم

\* توضیح: در مواردی که اختلاف مقاومت ویژه صفر منظور شده، در واقع، دو بخش نمونه از دو پیمانانه مختلف ریخته شده و احتمال تفاوت در مقاومت ویژه وجود دارد.

### ۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، نتیجه گیری به شرح زیر است.

۱- اختلاف در کیفیت بتن در بخش های مختلف هر عضو بتن مسلح می تواند سبب افزایش شدت خوردگی، کاهش مدت آغاز خوردگی شود. افزایش شدت خوردگی تا ۳۵ درصد است.

۲- اختلاف در کیفیت بتن ناشی از تفاوت در مقاومت ویژه (مقاومت الکتریکی) است. در نتیجه اختلاف پتانسیل بین دو بخش بتن (بخش ها با کیفیت های مختلف) ایجاد و خوردگی آغاز می شود.

۳- حتی در مواردی که هر دو بخش نمونه از یک نوع بتن است، اما از دو پیمانانه مختلف ریخته شده، تفاوت در کیفیت بتن وجود دارد و در نمونه، بتن ناهمگن است.

۴- امتداد بتن ریزی دو پیمانانه از بتن که در مجاور یکدیگر به صورت عمودی یا افقی ریخته شوند و امتداد آرماتور در مدت شروع خوردگی و اختلاف پتانسیل بین دو بخش از نمونه مؤثر است. مدت شروع خوردگی در ستون ها سریعتر از دال ها است. اختلاف در مدت آغازین خوردگی ستون ها و دال ها بسته به نوع بتن از یک هفته تا ۴ هفته بوده است.

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می شود، اختلاف بین مقاومت ویژه در دو بخش نمونه، سبب افزایش شدت خوردگی می شود؛ اما ارتباط به صورت خطی نیست. اما اختلاف مقاومت ویژه بین دو بخش یک نمونه حاوی دوده سیلیس در زمان شروع خوردگی محسوس است. به عبارت دیگر در نمونه های حاوی سیمان پرتلند (بدون دوده سیلیس) که دو بخش آن از نظر کیفیت متفاوت است (OH) با مقایسه با نمونه ساخته شده از سیمان پرتلند که دو بخش آن از نظر کیفیت مشابه است (OL)، اختلاف در مقاومت ویژه در زمان آغاز خوردگی تأثیر قابل توجهی نداشته است. اما در افزایش شدت خوردگی مؤثر بوده است. در حالی که مقایسه بین نمونه ML و MH که در آنها دوده سیلیس استفاده شده است، اختلاف مقاومت ویژه در دو بخش نمونه (MH) تأثیر قابل توجهی در کاهش زمان شروع خوردگی داشته است. اما در مقدار شدت خوردگی چندان تأثیر نداشته است. در نمونه OML که بخشی از آن حاوی دوده سیلیس و بخش دیگر بدون دوده سیلیس است، اختلاف زیاد مقاومت ویژه مشاهده می شود که باعث افزایش قابل توجه شدت خوردگی و کاهش چشمگیر زمان شروع خوردگی شده است.

## ۷- منابع

- [۱] فدوسی، ب، گنجیان، الف، پرهیزکار، ط؛ رمضان‌پور، ع؛ "فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس - آسیب شناسی بتن و ارزیابی آن"; انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸.
- [2] Al-Tayyib, A. J.; Rasheeduzzafar; Al-Mana, A. I.; "Deterioration of Concrete Structure in the Persian Gulf States"; 1<sup>st</sup> Inter. Conf. On Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Persian Gulf; 1985; pp. 27-48.
- [3] Gani, M.S.J.; "Cement and Concrete, Publisher Chapman & Hall"; 1997.
- [4] Slater, J.E.; ASTM Special Technical Publication, 818; "Corrosion of Metals in Association with Concrete"; ASTM, 1983.
- [5] Jones, M. R.; McCarthy, M. J.; Dhir, R. K.; "Chloride Resistant Concrete"; Inter. Conf of Concrete 2000; 1993; pp. 1429-1444.
- [6] Whittington, H. W.; McCarter, J.; Forde, M. C.; "The Conduction of Electricity Through concrete"; Magazine of Concrete Research; Vol. 33; No. 114; 1981; pp. 48-59.
- [7] Baweja, D.; Reper, H.; Sirivivatnanon, V.; "Specification of Concrete for Marine Environments : A Fresh Approach"; ACI Materials Journal; 1999; pp. 462-470.
- [8] Hisada, M.; Nagataki, S.; Otsuki, N.; "Evaluation of Mineral Admixtures on the Viewpoint of Chloride Ion Migration Through Mortar"; Cement & Concrete Composite Magazine; 21; 1999; pp. 443-448.
- [9] Mohammed, T. U.; Otsuki, N.; Hisada, M.; "Corrosion of Steel bars with Respect to Orientation in Concrete"; A CI Materials Journal; 1999; pp. 154-159

۵- استفاده از دوده سیلیس سبب افزایش مدت شروع خوردگی می‌شود، اما در صورتی که بخشی از بتن حاوی دوده سیلیس با نسبت آب به سیمان متفاوت با بخش دیگر نمونه باشد، مدت شروع خوردگی کاهش شدید می‌یابد. همچنین استفاده از دوده سیلیس در بخشی از عضو و استفاده از سیمان پرتلند (بدون دوده سیلیس) در بخش دیگر سبب کاهش شدید مدت شروع خوردگی می‌شود. برای مثال عضو ستون که به‌طور کامل با دوده سیلیس ساخته شده در مدت حدود ۷ هفته از نظر خوردگی فعال شد، در حالی که وقتی عضو ستون بخشی با سیمان پرتلند و بخشی با دوده سیلیس ساخته شده، مدت آغازین خوردگی ۱ هفته بوده است.

۶- در این پژوهش تفاوت در کیفیت بتن در بخش‌های مختلف عضو، بر اساس تغییر در نسبت آب به سیمان بوده است. زیرا این نوع تغییر بیشتر امکان دارد در کارگاه‌های ساخت رخ دهد. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که نه تنها این نوع تغییر در کیفیت سبب کاهش مدت آغاز خوردگی می‌گردد، بلکه حتی ساخت عضو با پیمان‌های مختلف (با یک نوع کیفیت) می‌تواند سبب ایجاد اختلاف پتانسیل و آغاز خوردگی در زمان کوتاه شود.

۷- با توجه به نتایج این تحقیق، پیمان‌های بتن در یک عضو نباید از کیفیت متفاوت برخوردار باشند و به ویژه پیمان‌هایی که حاوی دوده سیلیس باشند نباید در مجاور پیمان‌هایی ریخته شوند که بدون دوده سیلیس هستند.

## ۶- قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران که با حمایت خود و تأمین بودجه، انجام این پروژه را میسر کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.