

ارزیابی آزمایشگاهی خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی تحت تأثیر ترکیب سنگ‌دانه سولفاتی و شرایط محیطی کلریدی و سولفاتی

محمد کاظم شربتدار*

دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

آتنا حبیبی

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه دانشگاه سمنان

چکیده

در این مقاله تأثیر درازمدت شرایط محیطی متفاوت سولفاته، کلریدی و سالم و سنگ‌دانه‌های ناسالم سولفاته بر ۴۸ نمونه بتنی مکعبی و ۳۰ نمونه تیر منشوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌ها به مدت ۶ ماه در محیط‌های شبیه سازی شده نگهداری شده و سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان دهنده تأثیر منفی تر استفاده از سنگ‌دانه‌های ناسالم نسبت به محیط‌های نامناسب بود و اثر ترکیبی تا ۶ ماه باعث کاهش بیش از ۱۰ درصدی خواهد شد در حالیکه مقاومت بتن‌های با سنگ‌دانه و محیط سالم یک افزایش بیش از ۲۰ درصدی بعد از همین مدت را نشان داد. اثر منفی ترکیب سنگ‌دانه و محیط نامناسب سولفاتی نسبت به کلریدی بر مقاومت خمشی نمونه‌ها و کاهش بیشتر بیش از اثر مشابه بر کاهش مقاومت فشاری بعد از شش ماه بوده است.

واژه‌های کلیدی: دوام، مقاومت خمشی، نمونه‌های فشاری، کلریدی، سولفاتی.

* نویسنده مسئول: msharbatdar@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

خمشی تست حساس و قابل اعتمادی جهت نظارت پدیده ASR بود. کاهش خصوصیات مهندسی به همان سرعت یا نسبتی که انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگ‌دانه بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد اتفاق نمی‌افتد.

فان و هانسون^۲ [۴] تأثیر انبساط و ترک‌های حاصل از واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها بر رفتار سازه‌ای تیرهای بتن مسلح را در آزمایشگاه از طریق ساخت ۸۰ نمونه استوانه‌ای و ۶ عدد تیر بتن مسلح با دو نوع سنگ‌دانه فعال و غیرفعال و قرار دادن آن‌ها به مدت یک سال در محلول قلیایی مورد بررسی قرار دادند.

هامادا^۳ و همکاران [۵] آزمایش‌هایی را روی ۴ تیر بتن مسلح حاوی سیمان با میزان قلیائیت بالا و سنگ‌دانه‌های فعال جهت شبیه‌سازی واکنش قلیایی سنگ‌دانه (ASR) انجام دادند. همه تیرها در معرض باری به میزان ۵۰ درصد بار نهایی‌شان قرار گرفتند و سپس اجازه داده شد تا ASR تحت فشار پیشرفت کند. دو تا از تیرها در مقابل ASR محافظت نشدند، در یکی از تیرها به ASR در محیط خشک و به تیر دیگر در حالی که در محیط کلریدی مرطوب قرار گرفته بود اجازه پیشرفت به واکنش ASR داده شد. نتایج نشان داد که ASR تحت بار مدول الاستیسیته بتن را کاهش می‌دهد و ضریب خزش تیر را افزایش می‌دهد. پوشش سطحی زمانی که زود به کار برده شود، تأثیر خیلی زیادی در کاهش قابل توجه و مقابله در برابر اثرات سازه‌ای ASR و افزایش قابل توجه عملکرد تیرهای مبتلا به ASR تحت بار دارد.

مولتن^۴ و همکاران [۶] در زمینه رفتار سازه‌ای تیرهای بتن مسلح با واکنش قلیایی سنگ‌دانه آزمایش‌هایی را انجام دادند، بدین منظور ۵ عدد تیر بتن مسلح ساخته شد که ۲ نمونه تأثیر اختلاف آب و ۳ نمونه دیگر تأثیر آرماتورگذاری را بررسی می‌کرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که انبساط ASR بدون وجود آب هم می‌تواند رخ دهد و منجر به تخریب سازه‌ای قابل توجهی در سازه گردد. تورم قائم ناشی از انبساط دو برابر بیشتر از تورم افقی آن است. همچنین تأثیر آرماتورگذاری در کرنش ناشی از ASR در تیرها اندازه‌گیری شد و مشخص گردید که کاهش کرنش و تغییر شکل در جهت طولی برای تیرهای بتن مسلح در مقایسه با تیرهای معمولی قابل توجه است.

اصولاً در هر سازه بتنی لازم است مقاومت و بهره‌دهی آن در عمر مشخصی که برای آن لحاظ شده، حفظ گردد. در بسیاری از شرایط محیطی، دوام از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. معمولاً پی بردن به دوام بتن در شرایط مختلف نیاز به طی شدن زمان قابل توجه دارد به همین دلیل کارهای تحقیقاتی مرتبط با شبیه‌سازی در محیط تشدید یافته و مدت زمان کاهش یافته انجام می‌شود. نفوذپذیری بتن یکی از پارامترهای بسیار مهم و تعیین کننده میزان خسارت‌پذیری بتن در برابر عوامل خارجی مانند سولفات‌ها، کلورورها و سایر عوامل مخرب شیمیایی است [۱]. دوام ناکافی به‌صورت از هم پاشیدن بتن ظاهر می‌شود که می‌تواند در اثر عوامل خارجی یا داخلی موجود به‌صورت فیزیکی، شیمیایی و یا مکانیکی در خود بتن اتفاق بیفتد. عوامل شیمیایی شامل واکنش‌های قلیایی-سیلیسی و قلیایی-کربناتی و حمله شیمیایی یون‌های مهاجم مانند کلریدها، سولفات‌ها یا دی‌اکسید کربن و همچنین بسیاری از مایعات طبیعی یا صنعتی و گازها می‌باشد و خسارت مکانیکی در اثر ضربه، سایش، فرسایش و یا خلاءزایی پدیدار می‌شود. آب دریا پتانسیلی از انواع خرابی‌ها را در خود جای داده است ولی هیچ یک از آن‌ها به تنهایی باعث جدی شدن تخریب بتن نمی‌شود، مگر این که آب دریا بتواند به داخل بتن نفوذ کند. اساساً واکنش در سطح خارجی بتن که دائماً مرطوب بوده یا قسمت‌هایی که در معرض تناوب‌های تر و خشک شدن قرار دارند و در قسمت‌هایی با دمای بالاتر (بین ۱۰ تا ۳۸ درجه) انجام می‌شود [۲].

اسوامی^۱ و همکاران [۳] تأثیر واکنش قلیایی سنگ‌دانه را روی خواص مهندسی بتن مثل مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته و سرعت پالس نشان دادند. دو نوع سنگ‌دانه فعال یکی به‌صورت طبیعی و دیگری مصنوعی استفاده شد. نتایج نشان داد که کاهش خصوصیات مهندسی به همان سرعت یا نسبتی که انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگ‌دانه بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد اتفاق نمی‌افتد. دو خصوصیت اصلی که به علت ASR تحت تأثیر قرار می‌گیرند مقاومت خمشی و مدول دینامیکی الاستیسیته است. مقاومت فشاری شاخص خوبی برای ASR نبود، اما مقاومت

³ Hamada⁴ Multon¹Swamy² Fan, Hanson

خواص مکانیکی بتن در مواجهه با حمله سولفات‌ها، کلریدها و واکنش قلیایی سنگدانه‌ها می‌شود.

پرسی^۱ و همکاران [۱۲] برای بهبود درک واکنش قلیایی سیلیسی، تجزیه و تحلیل دقیقی روی نتایج آزمایشگاهی موجود در زمینه واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها انجام دادند و برای توضیح رفتار تغییر حجم میله‌های ملات حاوی واکنش سنگ‌دانه‌ها، یک مدل نظری ارائه داده‌اند. نتایج آزمایشگاهی موجود مدل دو لایه را پشتیبانی می‌کند. این نتایج موافق پیش‌بینی‌های مدل گوی-چاپمن می‌باشد. حاجی قاسمعلی و همکاران [۱۳] اثر توام واکنش قلیایی سیلیسی و خزش بر تیرهای بتن مسلح را از لحاظ رفتار خمشی، تأثیر درصد آرماتورهای کششی و فشاری و ظرفیت باربری مورد ارزیابی قرار دادند و نمونه‌ها به مدت یک سال در یک محفظه سرپوشیده با رطوبت ۱۰۰ درصد و دمای کنترل شده ۳۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. ملاحظه گردید که واکنش قلیایی باعث افزایش کرنش کششی و کاهش کرنش فشاری شده و ظرفیت خمشی نهایی آن‌ها پس از ۲۷۰ روز تعیین شد و مشخص گردید که واکنش قلیایی منجر به کاهش ظرفیت باربری تیرها می‌شود. در یک تحقیق انجام شده تأثیر مخرب واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی رفتار سازه‌های تیرهای بتنی مسلح با دو روش آزمایشگاهی و مدلسازی عددی و بر اساس روشهای تحلیل سازه‌های متداول بررسی شدند و تعدادی نمونه تیر ساخته شدند و پس از تحلیل سازه‌های نمونه‌ها با روشهای متداول، یک مدل عددی برای تیرها در برنامه انسیس با روش المان محدود ارائه شد که نتایج مدلسازی عددی، همگرایی خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد [۱۴]. ضمناً تحقیقات آزمایشگاهی ارزشمندی توسط مولتن و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۱۵] بر روی رفتار بتن‌های حاوی سنگ‌دانه‌های قلیایی در محیط‌ها با روت‌ها و شرایط متفاوت بررسی کردند.

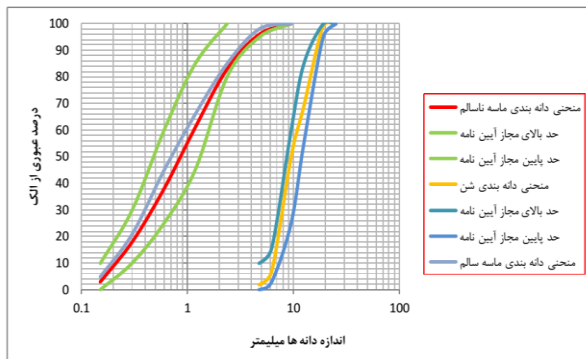
در این مقاله به‌صورت هم‌زمان و در حالت‌های مختلف اثر سنگ‌دانه‌های غیر سالم مستعد واکنش انبساطی به همراه محیط مخرب شیشه‌سازی شده در نمونه‌های فشاری و خمشی بررسی می‌گردد و علاوه بر نمونه‌های مکعبی، نمونه‌های منشوری خمشی بتنی ساخته شده و مقاومت‌ها و دوام آن‌ها در سنین مختلف تا ۱۸۰ روز بررسی شده است.

گنجیان و صادقی پویا [۷] تأثیر منطقه ساحلی خلیج فارس را بر دوام مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیسی و سرباره کوره آهن‌گدازی را مورد بررسی قرار دادند و نمونه‌های مکعبی ساخته شد و در سه محیط آب شرب، حوضچه‌های شیشه‌سازی شده همراه با چرخه تر و خشک شدن و محیط ساحلی خلیج فارس به مدت ۶ ماه نگهداری شد. نتایج نشان داد که سیمان پرتلند ساده نوع دو بهتر از سیمان مخلوط SF تحت چرخه تر و خشک شدن عمل می‌کند. نمونه‌های حاوی سیلیکافوم تحت چرخه تر و خشک شدن در آب شیشه‌سازی شده افت مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند ساده نوع دو که در آب شرب عمل آوری شده بودند، از خود نشان دادند. نتایج کار دیگری نشان داد که بتن‌های دارای سیمان میکروسیلیس، بهترین عملکرد را در مقابل خرابی و خوردگی داشته‌اند. پس از آن سیمان‌های دارای پامیس و توف به ترتیب دوام بیشتری را در محیط دریاچه ارومیه نشان داده‌اند [۸]. افشین و همکاران [۹] پارامترهای دوام بتن را علاوه بر ناحیه‌های جزر و مدی، مغروق و آزاد، در ناحیه‌های پاششی و اتمسفری نیز مورد ارزیابی قرار داده و در کلیه نواحی با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که وجود یون سولفات در محیط خورنده مورد آزمایش باعث کاهش مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های بتن عمل‌آوری شده در این محیط نسبت به محیط شاهد شده است. همچنین مقاومت الکتریکی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است. سلطانی و همکاران [۱۱،۱۰] تأثیر محیط‌های سولفاتی و کلریدی بر مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی متاکائولین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که محیط سولفات‌ها با توجه به فراهم آوردن شرایط مناسب واکنش قلیایی سنگدانه‌ها سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. محیط کلریدی نیز از جمله محیط‌های مخرب بتن می‌باشد که عملکرد کندتری نسبت به سولفات داشته ولی در کل باعث کاهش دوام بتن می‌شود. همچنین متاکائولین باعث بهبود خواص مکانیکی بتن در مواجهه با حمله سولفات‌ها، کلریدها و واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها می‌شود در ضمن تحقیقات دیگر نشان داد که واکنش قلیایی منجر به کاهش ظرفیت باربری تیرها و متاکائولین باعث بهبود

¹ Prezzi

۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

برای بررسی اثر مخرب سنگ‌دانه‌های ناسالم مستعد انبساط حجمی و محیط‌های نامناسب اطراف بتن، تعداد ۴۸ عدد نمونه مکعبی فشاری و ۳۰ عدد نمونه تیر منشوری بتنی غیر مسلح با طرح اختلاط مشخص ساخته شدند و به مدت ۶ ماه در محیط‌های شبیه سازی شده نگهداری شدند و سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی بر روی نمونه‌های مورد نظر انجام شد.



شکل ۱- دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه

۱-۲- مواد و مصالح مصرفی

مصالح سنگی به کار رفته در بتن عموماً شامل مصالح سنگی درشت‌دانه (شن) و مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) است. مصالح به کار رفته در این تحقیق شامل شن سالم و ماسه سالم و ناسالم است. مصالح ناسالم به کار رفته که از یکی از معادن شن و ماسه موجود در حال بهره برداری تهیه شده است دارای میزان بالای سولفات بود که مقدار آن بر روی ماسه توسط آزمایشگاه مصالح ساختمانی اندازه‌گیری شد و برابر ۱/۱۳ درصد وزنی گزارش اعلام شد، که این مقدار با میزان مجاز آن مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲، که ۰/۴ درصد می‌باشد تفاوت زیادی دارد. آزمایش دانه‌بندی جهت تعیین نحوه توزیع اندازه دانه‌های سنگی به کار می‌رود. دانه‌بندی دانه‌ها به کمک الک بر اساس ACI 211 استاندارد ASTM C33 صورت می‌گیرد که نمودار دانه‌بندی حاصله از شن و ماسه به کار رفته در این مطالعه در شکل نشان داده شده است. دانه‌بندی و حداکثر اندازه سنگ‌دانه علاوه بر تأثیر بر نسبت ترکیب سنگ‌دانه‌ها، بر سیمان و آب مورد نیاز، کارایی، قابلیت پمپاژ، مقرون به صرفه بودن، تخلخل، جمع‌شدگی و دوام (پایایی) بتن نیز تأثیر می‌گذارد. تغییرات دانه‌بندی همچنین می‌تواند تأثیر مهمی در یکنواختی بتن داشته باشد. چگالی در حالت درون اشباع با سطح خشک (SSD) درشت‌دانه طبق استاندارد ASTM C127 برابر ۲/۵۲ محاسبه گردیده و حداکثر قطر سنگ‌دانه آن 12 mm بوده است. همچنین چگالی ظاهری در حالت درون اشباع با سطح خشک ریزدانه نیز طبق استاندارد ASTM C128 برابر ۲/۷۶ محاسبه شده است. مدول نرمی ماسه سالم ۲/۸ و مدول نرمی ماسه ناسالم ۳ می‌باشد. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند نوع یک کارخانه سیمان شاهرود بود.

۲-۲- طرح اختلاط بتن و مشخصات نمونه‌ها

درصد اختلاط اجزا بتن با نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۵ مطابق با استاندارد ACI-211-89 تعیین گردیده است، با توجه به این که آب اولیه محاسبه شده برابر ۲۰۸ کیلوگرم با فرض شن و ماسه اشباع با سطح خشک می‌باشد ولی شن و ماسه واقعی مصرفی بصورت خشک بودند به میزان جذب آب شن و ماسه، آب اضافه شد و مقدار آب نهایی برابر ۲۳۰ کیلوگرم شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت ساخت بتن معمولی، ابتدا شن، سیمان و ماسه را با یکدیگر مخلوط و سپس ۲۰٪ آب موجود جهت به اشباع رساندن سنگ‌دانه‌ها اضافه شد و مابقی آب در حین اختلاط به میکسر اضافه گردید.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن معمولی در یک مترمکعب بتن (kg)

| مولفه | W/C | سیمان (kg) | آب اولیه (kg) | آب نهایی (kg) | شن (kg) | ماسه (kg) | بتن (kg) |
|-------|------|------------|---------------|---------------|---------|-----------|----------|
| مقدار | ۰/۵۵ | ۳۷۹/۶ | ۲۰۸ | ۲۳۰ | ۹۷۶ | ۷۴۶ | ۲۳۲۲ |

در این مطالعه جهت تعیین مقاومت فشاری و وزن مخصوص از ۴۸ نمونه مکعبی، تعیین مقاومت خمشی از ۳۰ نمونه تیر و ۱۲ نمونه دال استفاده شده است. مشخصات و تعداد نمونه‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است و نوع آزمایشات مورد نظر بر روی نمونه‌ها در جدول ۳ داده شده‌اند و نام گذاری نمونه‌ها در جدول ۴ داده شده است.

۳-۲- شرایط نگهداری نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های متعدد و بررسی دوام نمونه‌ها در ای متفاوت، دو نوع محیط سالم و ناسالم شبیه سازی شد و نمونه‌ها تا حدود ۶ ماه عمل آوری شدند.

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های مورد استفاده

| ردیف | نوع نمونه | تست خمشی دال بتنی | تست فشاری + تست منشور خمشی |
|------|--------------------------------|----------------------|---|
| ۱ | سنگدانه سالم + محیط سالم | ۲ عدد دال ۴@۲۰@۶۰ | ۸ نمونه مکعبی ۱۰@۱۰@۱۰ + ۶ نمونه تیر ۶@۸@۳۳ |
| ۲ | سنگدانه سالم + محیط ناسالم ۱ | ۲ عدد دال ۴@۲۰@۶۰ | ۸ نمونه مکعبی ۱۰@۱۰@۱۰ + ۶ نمونه تیر ۶@۸@۳۳ |
| ۳ | سنگدانه سالم + محیط ناسالم ۲ | ۲ عدد دال ۴@۲۰@۶۰ | ۸ نمونه مکعبی ۱۰@۱۰@۱۰ + ۶ نمونه تیر ۶@۸@۳۳ |
| ۴ | سنگدانه ناسالم + محیط سالم | ۲ عدد دال ۴@۲۰@۶۰ | ۸ نمونه مکعبی ۱۰@۱۰@۱۰ + ۶ نمونه تیر ۶@۸@۳۳ |
| ۵ | سنگدانه ناسالم + محیط ناسالم ۱ | ۲ عدد دال ۴@۲۰@۶۰ | ۸ نمونه مکعبی ۱۰@۱۰@۱۰ + ۶ نمونه تیر ۶@۸@۳۳ |
| ۶ | سنگدانه ناسالم + محیط ناسالم ۲ | ۲ عدد دال ۴@۲۰@۶۰ | ۸ نمونه مکعبی ۱۰@۱۰@۱۰ + ۶ نمونه تیر ۶@۸@۳۳ |

است. نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در محیط به صورت کاملاً مغروق در آب است. نحوه عمل‌آوری نمونه‌ها شامل سیکل‌های تر و خشک شدن متناوب است به طوری که هر کدام از این محیط‌ها با دو وان مجزا بوسیله پمپ با برنامه زمان بندی پر و تخلیه می‌شوند. در هر ۲۴ ساعت یک سیکل تر و خشک صورت می‌گیرد که هر سیکل شامل ۱۲ ساعت خیس شدن و ۱۲ ساعت خشک شدن می‌باشد. دمای این محیط‌ها نیز ۲۰-۲۵ درجه سانتیگراد است. نتیجه آنالیز شیمیایی برخی یون‌های موجود در آب محیط‌های این تحقیق و مقایسه آن با آب‌های مخرب ایران و آب شرب در جدول ۵ آمده است. تعدادی از نمونه‌های ساخته شده پس از قرارگیری در محیط مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳- نوع آزمایشات انجام شده روی نمونه‌ها

| ردیف | نوع آزمایش | نوع نمونه | محیط نگهداری | عمر نمونه‌های آزمایش |
|------|------------|---|---------------------------------|---|
| ۱ | فشاری | مکعب ۱۰@۱۰@۱۰ | شاهد، تر و خشک کلریدی و سولفاتی | ۲۸، ۷ و ۹۰ و ۱۸۰ روز بعد از قرارگیری در محیط‌ها |
| ۲ | منشور خمشی | تیر ۶@۸@۳۳ | شاهد، تر و خشک کلریدی و سولفاتی | ۲۸، ۱۴ و ۱۸۰ روز بعد از قرارگیری در محیط‌ها |
| ۳ | خمشی | دال ۴@۲۰@۶۰ دال ۴/۷@۲۰@۶۰ دال ۵/۵@۲۰@۶۰ | شاهد، تر و خشک کلریدی و سولفاتی | ۱۸۰ روز بعد از قرارگیری در محیط‌ها |

جدول ۵- یون‌های موجود در آب‌های مخرب و مقایسه آن با آب مورد استفاده در این تحقیق (PPM) و آب شرب

| آب محیط | آب محیط در این تحقیق | آب شرب | آب دریاچه ارومیه | آب خلیج فارس | آب جزیره کیش | یون‌های موجود در آب |
|---------|----------------------|--------|------------------|--------------|--------------|---------------------|
| --- | --- | ۷۸ | ۸۶۰۶۶ | ۱۲۴۰۰ | ۱۱۴۰۰ | Na |
| --- | --- | ۲/۶ | ۱۴۰۴ | ۴۵۰ | ۳۹۷ | K |
| ۱۵۳۶ | ۳۵۲ | ۸/۰۱ | ۱۳۶۰ | ۴۳۰ | ۴۵۰ | Ca |
| ۳۱۱۰۴ | ۲۶۷/۳ | ۳/۹ | ۱۲۴۱۸ | ۱۴۶۰ | ۱۶۰۰ | Mg |
| ۶۷۶/۸ | ۹۳۰۶۰ | ۹۹/۳۶ | ۱۴۳۷۰۴ | ۲۱۴۵۰ | ۲۲۳۳۰ | Cl |
| --- | --- | --- | ۲۲۷۵۲ | ۲۷۲۰ | ۳۰۷۰ | So ₄ |

جدول ۴- نام گذاری نمونه‌ها

| ردیف | نوع نمونه | دال‌ها | تعداد | مکعب‌ها | تعداد | تیرها | تعداد |
|------|--------------------------------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|
| ۱ | سنگدانه سالم + محیط سالم | NNC1F90 | ۲ | NNC7 | ۲ | NNF14 | ۲ |
| ۲ | سنگدانه سالم + محیط ناسالم ۱ | NCC1F90 | ۲ | NCC7 | ۲ | NCF14 | ۲ |
| ۳ | سنگدانه سالم + محیط ناسالم ۲ | NSC1F90 | ۲ | NSC7 | ۲ | NSF14 | ۲ |
| ۴ | سنگدانه ناسالم + محیط سالم | SNC1F90 | ۲ | SNC7 | ۲ | SNF14 | ۲ |
| ۵ | سنگدانه ناسالم + محیط ناسالم ۱ | SCC1F90 | ۲ | SCC7 | ۲ | SCF14 | ۲ |
| ۶ | سنگدانه ناسالم + محیط ناسالم ۲ | SSC1F90 | ۲ | SSC7 | ۲ | SSF14 | ۲ |

۳- آزمایش‌های انجام شده
در این تحقیق برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی شکل استفاده شده است که مقاومت فشاری برابر نسبت نیروی ماکزیمم به سطح مقطع نمونه ($f_{cu} = \frac{P}{A}$) به دست می‌آید. که در آن f_{cu} : مقاومت فشاری نمونه مکعبی بر حسب MPa؛ P: نیروی حداکثر فشاری بر حسب N؛ A: سطح مقطع بتن بر حسب mm^2 می‌باشد. هدف از انجام آزمایشات تیرها، تعیین طاقت خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C78-94 و ASTM C1018 می‌باشد. مکانیزم دستگاه یونیورسال کنترل تغییر مکان است و جهت انجام آزمایش از نمونه‌های تیر به عرض ۸ سانتیمتر، طول ۳۳ سانتیمتر و ارتفاع ۶ سانتیمتر استفاده شده است. فاصله تکیه‌گاه برای تیر بتنی همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود ۲۵ سانتیمتر می‌باشد.

محیط سالم، حوضچه‌ای شامل آب شرب با دمای محیط ۲۰-۲۵ درجه بود که نمونه‌ها به مدت ۱۸۰ روز در این محیط قرار گرفتند. دو نوع محیط مختلف ناسالم جهت عمل‌آوری نمونه‌ها و تأثیر آن-ها بر دوام در نظر گرفته شد که در واقع شرایط محیط مخرب خلیج فارس شبیه‌سازی شده است. محیط اول، محیط کلریدی است که شامل محلول ۱۰ درصد کلرید سدیم است تا غلظت بالایی از املاح نمکی مشابه محیط خلیج فارس شبیه‌سازی شود و محیط دوم، سولفاتی است که شامل محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم

۴- مشاهدات و نتایج اولیه

متغیرهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند نوع سنگدانه، نوع محیط‌ها و پارامتر زمان بود. سنگدانه شامل دو نوع سنگدانه سالم و ناسالم، محیط‌ها سه نوع شامل محیط سالم، محیط کلریدی و محیط سولفاتی می‌باشد و مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز تعیین گردید که در جدول ۶ داده شده است. برای هر حالت دو نمونه آزمایش شده است و مقاومت متوسط دو نمونه در جدول ۶ ارائه شده است. به منظور بررسی تاثیر محیط‌های مختلف بر مقاومت خمشی بتن، تیرهایی به عرض ۶ سانتیمتر، ارتفاع ۸ سانتیمتر، طول ۳۳ سانتیمتر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش مقاومت خمشی در عمر ۱۴، ۲۸ و ۱۸۰ روزگی بر روی تیرهای منشوری انجام شد که نتایج متوسط نمونه‌ها در جدول ۷ مشاهده می‌شوند.

جدول ۶- مقاومت فشاری میانگین نمونه‌های مکعبی (MPa)

| ردیف | نوع سنگدانه | نوع محیط | نام نمونه | ۷ روزه | ۲۸ روزه | ۹۰ روزه | ۱۸۰ روزه |
|------|-------------|----------|-----------|--------|---------|---------|----------|
| ۱ | سالم | سالم | NNC | ۳۶/۶۰ | ۴۰/۴۹ | ۴۵/۹۸ | ۵۶/۶۳ |
| ۲ | سالم | کلریدی | NCC | ۳۵/۵۴ | ۴۰/۵۵ | ۴۶/۰۸ | ۴۶/۶۷ |
| ۳ | سالم | سولفاتی | NSC | ۳۶/۷۹ | ۳۹/۳۴ | ۴۵/۷۴ | ۴۴/۹۱ |
| ۴ | ناسالم | سالم | SNC | ۳۷/۳۹ | ۴۱/۰۶ | ۴۸/۳۳ | ۵۴/۶۵ |
| ۵ | ناسالم | کلریدی | SCC | ۳۸/۱۲ | ۴۱/۲۲ | ۵۵/۰۹ | ۴۹/۶۵ |
| ۶ | ناسالم | سولفاتی | SSC | ۳۷/۸۶ | ۴۰/۶۹ | ۴۶/۴۵ | ۴۳/۲۱ |

به منظور بررسی و اطمینان بیشتر رفتار خمشی بتن، نمونه‌های دال مستطیلی به عرض ۲۰، ارتفاع ۴ و طول کل ۶۰ سانتیمتر آماده شده است. تمامی نمونه‌ها ۴۸ ساعت بعد از بتن‌ریزی از قالب خارج و به مدت ۷ روز در حوضچه‌ای محتوی آب شرب و در دمای ۲۰°C نگهداری و سپس به محیط‌های مورد نظر منتقل شدند. با گذشت زمان تغییراتی در نمونه‌هایی که در محیط کلریدی و سولفاتی قرار داشتند، مشاهده شد که در شکل ۵ قابل مشاهده است.

همانطور که مشاهده می‌شود خرابی در هر دو محیط از گوشه‌ها شروع شده و به مرور زمان بر میزان آن افزوده می‌شود. آزمایش



شکل ۲- نمونه‌های ساخته شده پس از قرارگیری در محیط



شکل ۳- نحوه انجام آزمایش خمشی تیر منشوری

مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) تیر منشوری تحت بار متمرکز بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$f_r = \sigma = \frac{M}{S} = \frac{Pl/4}{bh^2/6} = \frac{6pl}{4bh^2} \quad (1)$$

هدف از انجام آزمایشات دال‌ها، تعیین مقاومت خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C1018 و ASTM C78-94 می‌باشد. جهت انجام آزمایش نمونه‌های دال به عرض ۲۰ سانتیمتر، طول ۶۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴ سانتیمتر استفاده شد. فاصله تکیه‌گاه برای دال‌های بتنی همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ۵۰ سانتیمتر می‌باشد.



شکل ۴- نحوه انجام آزمایش خمشی دال

۵- تجزیه و تحلیل نتایج و بررسی تأثیر متغیرها

۵-۱- مقاومت فشاری نمونه ها

در بررسی تأثیر پارامتر زمان بر مقاومت فشاری نمونه‌ها، دو متغیر دیگر (سنگدانه و محیط) ثابت فرض شدند و تنها عامل زمان تغییر می‌کند. متناسب به زمان های ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه، تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها با سنگدانه های سالم و ناسالم در محیط سالم، کلریدی و سولفاتی در طول زمان به ترتیب در جداول ۹ تا ۱۱ داده شده اند.

تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها بر حسب زمان در شکل ۶ رسم شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با گذشت زمان، مقاومت فشاری در محیط سالم افزایش می‌یابد، در حالی که در طول دوره اولیه، مقاومت سنگدانه ناسالم بیش از سنگدانه سالم می‌باشد ولی با گذشت زمان و به‌ویژه در انتهای دوره، مقاومت نمونه با سنگدانه سالم بیش از نمونه با سنگدانه ناسالم شده است. همچنین میزان مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط کلریدی تا سن تقریباً ۱۰۰ روز افزایشی است ولی مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم بعد از گذشت ۱۰۰ روز تقریباً ثابت باقی مانده در حالی که مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه ناسالم در حال کاهش می‌باشد که نشان دهنده کاهش تدریجی و افزایشی در طول عمر سازه خواهد داشت در ضمن مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سولفاتی نیز مانند کلریدی تا سن تقریباً ۱۰۰ روز روند افزایشی دارد.

بعد از ۱۰۰ روز میزان مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم ۱/۸۱ درصد و میزان مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه ناسالم ۶/۸۹ درصد کاهش دارد که این کاهش در سنگدانه ناسالم بیشتر است.

جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌ها در طول زمان، روابطی در دو قسمت جداگانه کمتر از ۷ روز و بعد از ۷ روز به تفکیک و بر حسب زمان t و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای $f'_{c(28)}$ پیشنهاد شده است. رابطه برای سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سالم برای زمان کمتر از ۷ روز بصورت خطی $f_{(c)} = 0/13 f'_{c(28)} t$ و برای زمان بین ۷ تا ۱۸۰ روز بصورت رابطه غیرخطی ۲ و ۳ به ترتیب برای سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سالم پیشنهاد شده است.

این نمونه‌ها نیز همانند تیرهای منشوری توسط دستگاه یونیورسال با فاصله بین تکیه‌گاهی ۵۰ سانتیمتر و ۱۸۰ روز بعد از قرارگیری نمونه‌ها در محیط انجام شده است که نتایج آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷- مقاومت خمشی میانگین تیرهای منشوری (MPa)

| ردیف | نوع سنگدانه | نوع محیط | نام نمونه | ۱۴ روزه | ۲۸ روزه | ۱۸۰ روزه |
|------|-------------|----------|-----------|---------|---------|----------|
| ۱ | سالم | سالم | NNF | ۵/۹۰ | ۶/۲۹ | ۶/۸۰ |
| ۲ | سالم | کلریدی | NCF | ۶/۲۳ | ۶/۲۰ | ۵/۹۴ |
| ۳ | سالم | سولفاتی | NSF | ۶/۲۶ | ۶/۲۱ | ۵/۸۵ |
| ۴ | ناسالم | سالم | SNF | ۵/۳۱ | ۷/۰۲ | ۶/۷۵ |
| ۵ | ناسالم | کلریدی | SCF | ۵/۴۹ | ۶/۸۷ | ۶/۲۳ |
| ۶ | ناسالم | سولفاتی | SSF | ۵/۴۹ | ۶/۷۲ | ۵/۸۸ |



شکل ۵- نمونه‌های سالم ۶ ماه پس از قرارگیری در محیط

جدول ۸- مقاومت خمشی دال‌های بتنی بعد از ۱۸۰ روز

| ردیف | نام نمونه | نوع سنگدانه | نوع محیط | میانگین (MPa) |
|------|-----------|-------------|----------|---------------|
| ۱ | NNC1F180 | سالم | سالم | ۹/۰۵ |
| ۲ | NCC1F180 | سالم | نمکی | ۸/۶ |
| ۳ | NSC1F180 | سالم | سولفاتی | ۸/۹۹ |
| ۴ | SNC1F180 | ناسالم | سالم | ۸/۷ |
| ۵ | SCC1F180 | ناسالم | نمکی | ۷/۴۸ |
| ۶ | SSC1F180 | ناسالم | سولفاتی | ۸/۱ |

جدول ۹- تأثیر گذشت زمان بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

با سنگ‌دانه سالم و ناسالم و در محیط سالم

| نام نمونه (سالم) | مقاومت فشاری (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه | نام نمونه (ناسالم) | مقاومت فشاری (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه |
|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| NNC7 | ۳۶/۶۰ | ۰/۹ | SNC7 | ۳۷/۳۹ | ۰/۹۱ |
| NNC28 | ۴۰/۴۹ | ۱ | SNC28 | ۴۱/۰۶ | ۱ |
| NNC90 | ۴۵/۸۹ | ۱/۱۴ | SNC90 | ۴۸/۳۳ | ۱/۱۸ |
| NNC180 | ۵۶/۶۳ | ۱/۴ | SNC180 | ۵۴/۶۵ | ۱/۳۳ |

جدول ۱۰- تأثیر گذشت زمان بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با سنگ‌دانه سالم و ناسالم و در محیط کلریدی

| نام نمونه (سالم) | مقاومت فشاری (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه | نام نمونه (ناسالم) | مقاومت فشاری (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه |
|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| NCC7 | ۳۵/۵۴ | ۰/۸۸ | SCC7 | ۳۸/۱۲ | ۰/۹۲ |
| NCC28 | ۴۰/۵۵ | ۱ | SCC28 | ۴۱/۲۲ | ۱ |
| NCC90 | ۴۶/۰۸ | ۱/۱۴ | SCC90 | ۵۵/۰۹ | ۱/۳۴ |
| NCC180 | ۴۶/۶۷ | ۱/۱۵ | SCC180 | ۴۹/۶۵ | ۱/۲۰ |

جدول ۱۱- تأثیر گذشت زمان بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با سنگ‌دانه سالم و ناسالم و در محیط سولفاتی

| نام نمونه (سالم) | مقاومت فشاری (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه | نام نمونه (ناسالم) | مقاومت فشاری (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه |
|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| NSC7 | ۳۶/۷۹ | ۰/۹۴ | SSC7 | ۳۷/۸۶ | ۰/۹۳ |
| NSC28 | ۳۹/۳۴ | ۱ | SSC28 | ۴۰/۶۹ | ۱ |
| NSC90 | ۴۵/۷۴ | ۱/۱۶ | SSC90 | ۴۶/۴۵ | ۱/۱۴ |
| NSC180 | ۴۴/۹۱ | ۱/۱۴ | SSC180 | ۴۳/۲۱ | ۱/۰۶ |

$$f_c = f'_{c(28)}(-8.78 \times 10^{-6}t^2 + 4.04 \times 10^{-3}t + 0.887) \quad (۳)$$

پیشنهاد می‌شود، ضریب همبستگی این روابط بیش از ۰/۹۶ می‌باشد که نشان‌دهنده مطابقت خوب رابطه پیشنهادی و نمودار می‌باشد.

روابط برای سنگ‌دانه سالم و ناسالم در محیط کلریدی برای زمان کمتر از ۷ روز بصورت خطی و به ترتیب بصورت $f_c = 0.125f'_{c(28)}t$ و $f_c = 0.132f'_{c(28)}t$ برای زمان بین ۷ تا ۱۸۰ روز بصورت روابط غیرخطی ۴ و ۵ پیشنهاد می‌شود و ضریب همبستگی این رابطه ۰/۹۷ می‌باشد.

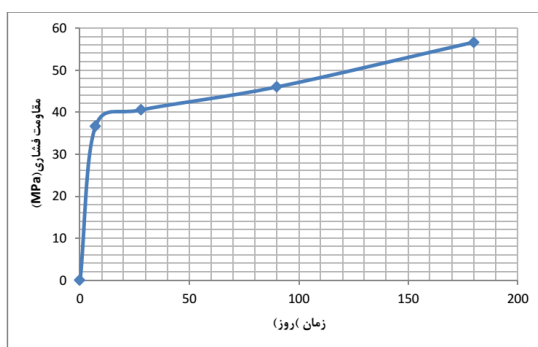
$$f_c = f'_{c(28)}(-1.75 \times 10^{-5}t^2 + 4.78 \times 10^{-3}t + 0.86) \quad (۴)$$

$$f_c = f'_{c(28)}(-3.63 \times 10^{-5}t^2 + 8.61 \times 10^{-3}t + 0.83) \quad (۵)$$

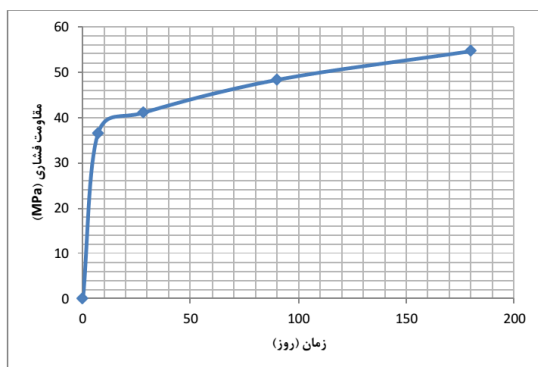
رابطه برای سنگ‌دانه سالم و ناسالم در محیط سولفاتی برای زمان کمتر از ۷ روز بصورت خطی بصورت $f_c = 0.133f'_{c(28)}t$ و برای زمان بین ۷ تا ۱۸۰ روز بصورت روابط غیرخطی ۶ و ۷ پیشنهاد می‌شود و ضریب همبستگی این رابطه ۰/۹۹ می‌باشد.

$$f_c = f'_{c(28)}(1.704 \times 10^{-5}t^2 + 4.423 \times 10^{-3}t + 0.899) \quad (۶)$$

$$f_c = f'_{c(28)}(1.986 \times 10^{-5}t^2 + 4.473 \times 10^{-3}t + 0.896) \quad (۷)$$



الف- سنگ‌دانه سالم و محیط سالم

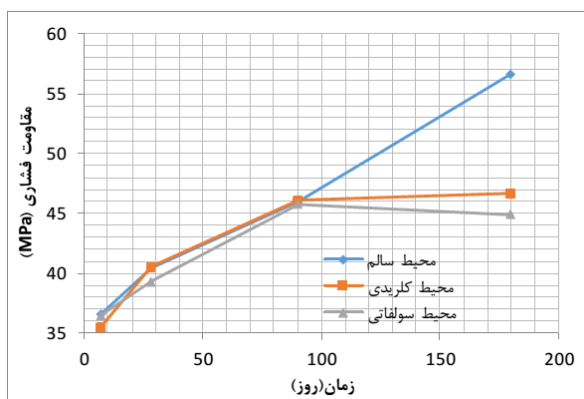


ب- سنگ‌دانه ناسالم و محیط سالم

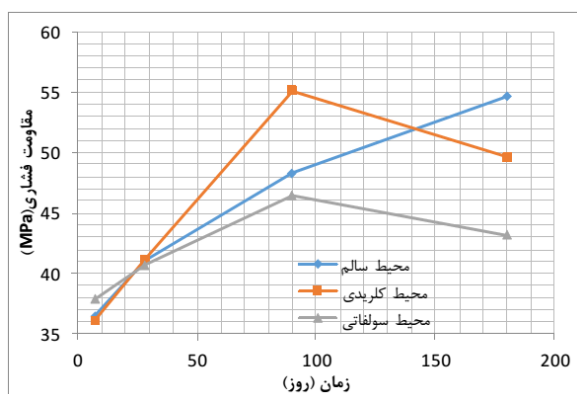
$$f_c = f'_{c(28)}(3.59 \times 10^{-7}t^2 + 2/69 \times 10^{-3}t + 0.9) \quad (۲)$$

نیز تنها متغیر محیط است و دو پارامتر دیگر ثابت فرض شدند. مقاومت فشاری نمونه ها با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط کلریدی و سولفاتی به ترتیب در شکل ۷ نشان داده شده است.

مشاهده می شود تاثیر منفی محیطها بر روی نمونه های با سنگدانه سالم از سن ۹۰ روز دیده می شود از این زمان به بعد میزان مقاومت فشاری در محیط سالم همچنان افزایشی است، در محیط کلریدی تقریباً ثابت شده است و در محیط سولفاتی کاهش داشته است. در نمونه های با سنگدانه ناسالم نیز تا سن ۹۰ روز مقاومت فشاری در کلیه محیطها افزایشی است، بعد از آن در محیط سالم همچنان افزایش مقاومت، در محیط کلریدی و سولفاتی کاهش مقاومت مشاهده می شود. محیط سولفاتی با توجه به فراهم آوردن شرایط مناسب واکنش قلیایی سنگدانه ها سبب کاهش مقاومت فشاری می شود که این نتایج با نتایج تحقیقات گذشته مطابقت خوبی دارد.



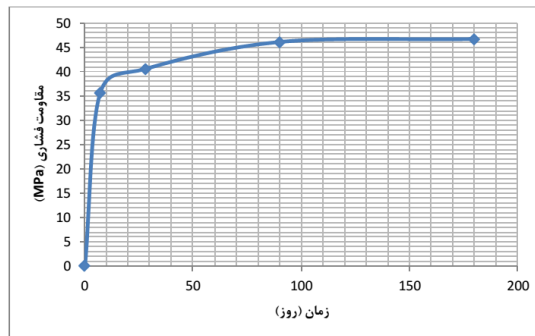
الف - نمونه با سنگدانه سالم



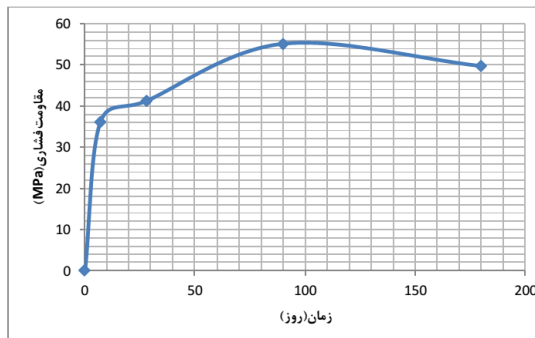
ب - نمونه با سنگدانه ناسالم

شکل ۷ - مقاومت فشاری نمونه ها در محیط های مختلف

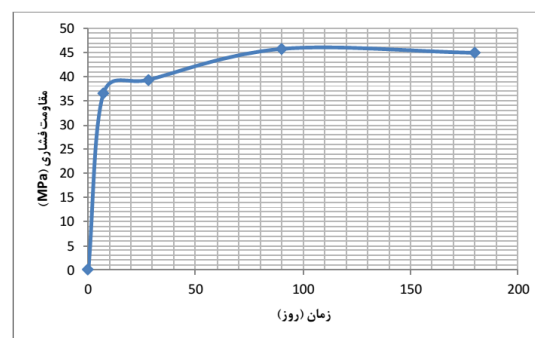
محیط کلریدی نیز از جمله محیط های مخرب بتن می باشد که عملکرد کندتری نسبت به سولفات داشته ولی در کل باعث کاهش دوام بتن می شود. رفتار کلیه نمونه ها با تاثیر محیط، در شکل ۸



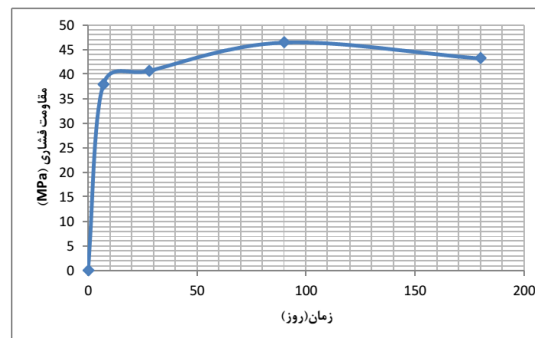
ج - سنگدانه سالم و محیط کلریدی



د - سنگدانه ناسالم و محیط کلریدی



ه - سنگدانه سالم و محیط سولفاتی



و - سنگدانه ناسالم و محیط سولفاتی

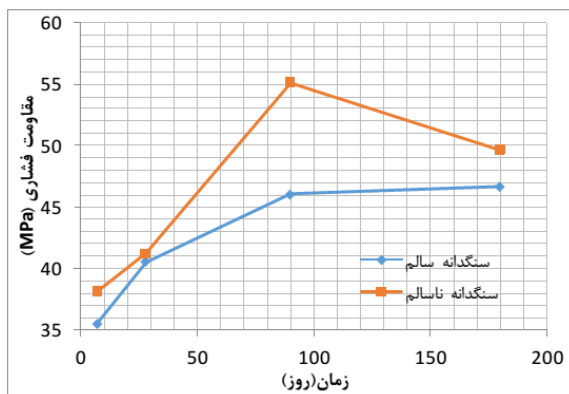
شکل ۶ - نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها بر حسب زمان

به منظور بررسی تاثیر محیط بر خواص مکانیکی بتن، دو نوع محیط (۱۰٪ کلرید سدیم و ۱۰٪ سولفات منیزیم) در نظر گرفته شد و نتایج بدست آمده با محیط سالم مقایسه شده است. در این قسمت

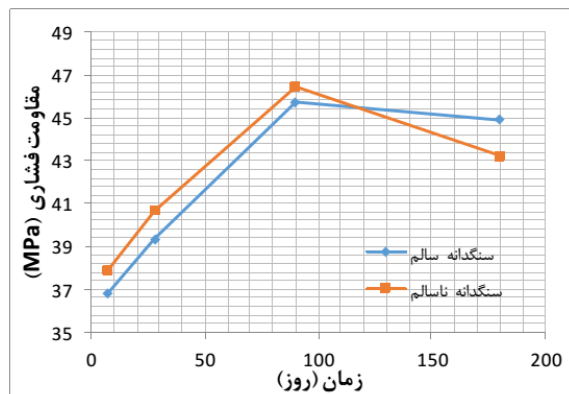
مقاومت نمونه‌های با سنگدانه ناسالم در محیط سولفاتی تا سن ۱۱۰ روز بیش از نمونه‌های با سنگدانه سالم است، ولی با گذشت زمان همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نمونه با سنگدانه ناسالم کاهش پیدا کرده است و در سن ۱۸۰ روزگی به کمتر از نمونه‌های با سنگدانه سالم رسیده است. لذا مطابق آئین نامه‌های طراحی اثر درازمدت تخریبی محیط‌های خوردنده سولفاتی و کلریدی باید در طراحی اولیه و انتخاب مصالح مناسب باید مدنظر قرار گیرد و پیشگیری‌های لازم با عدم استفاده از مصالح ناسالم یا افزودن مواد مناسب معدنی یا شیمیایی باید بکار گرفته شود.

۵-۲- مقاومت خمشی تیرهای منشوری

در این قسمت تأثیر پارامتر زمان بر مقاومت خمشی تیرهای منشوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور دو متغیر دیگر (سنگدانه و محیط) ثابت فرض شدند و تنها عامل زمان تغییر می‌کند. نتایج مربوطه در جداول ۱۲ تا ۱۴ مشاهده می‌شود.

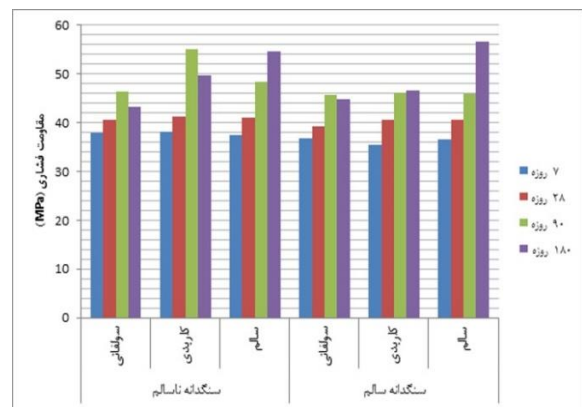


شکل ۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط کلریدی در طول زمان

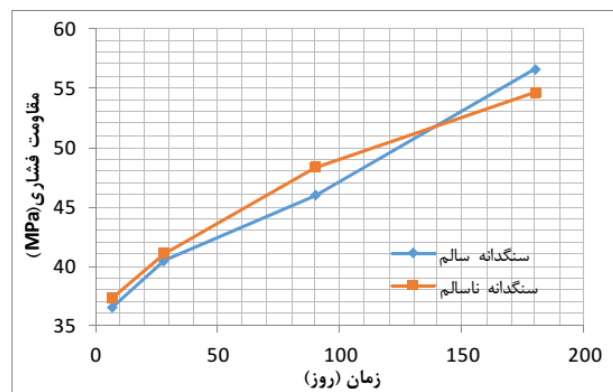


شکل ۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سولفاتی در طول زمان

دیده می‌شود. به منظور بررسی تأثیر نوع سنگدانه بر خواص مکانیکی بتن، دو نوع سنگدانه (سالم و ناسالم با میزان سولفات بیش از حد مجاز) در نظر گرفته شد و مقاومت فشاری نمونه‌ها با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط‌های مشابه به ترتیب در اشکال ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت نمونه‌های با سنگدانه ناسالم در محیط سالم تا سن ۱۴۰ روز بیش از نمونه‌های با سنگدانه سالم است که علت آن دانه‌بندی درشت‌تر سنگدانه ناسالم بوده و در کوتاه مدت تأثیر این سنگدانه در کاهش مقاومت فشاری بروز داده نشده است، ولی با گذشت زمان مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه ناسالم کاهش می‌یابد و در سن ۱۸۰ روزگی حتی به کمتر از نمونه‌های با سنگدانه سالم می‌رسد.



شکل ۸- تأثیر محیط بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در طول زمان



شکل ۹- مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سالم در طول زمان

همچنین مشاهده است مقاومت نمونه‌های با سنگدانه ناسالم در محیط کلریدی تا سن ۹۰ روز افزایشی بوده ولی بعد از آن کاهش شدید داشته است. در محیط سالم نیز تا سن ۹۰ روز این روند افزایشی بوده است اما بعد از آن تقریباً ثابت شده است. ضمناً

جدول ۱۴- تاثیر گذشت زمان بر مقاومت خمشی تیرهای

منشوری با سنگدانه سالم و ناسالم و در محیط سولفاتی

| نام نمونه (سالم) | مقاومت خمشی (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه | نام نمونه (ناسالم) | مقاومت خمشی (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه |
|------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| NSF14 | ۶/۲۶ | ۱/۰۱ | SSF14 | ۵/۴۹ | ۰/۸۲ |
| NSF28 | ۶/۲۱ | ۱ | SSF28 | ۶/۷۲ | ۱ |
| NSF180 | ۵/۸۵ | ۰/۹۴ | SSF180 | ۵/۸۸ | ۰/۸۸ |

به منظور بررسی تاثیر محیط بر خواص مکانیکی بتن، دو نوع محیط (۱۰٪ کلرید سدیم و ۱۰٪ سولفات منیزیم) در نظر گرفته شد و نتایج بدست آمده با محیط شاهد مقایسه شده است. در این قسمت نیز تنها متغیر محیط است و دو پارامتر دیگر ثابت فرض شدند. مقادیر مقاومت خمشی حاصل از آزمایشات که نشان دهنده تاثیر محیط‌های مختلف می‌باشد در جداول ۱۵ و ۱۶ آورده شده است.

جدول ۱۵- مقاومت خمشی نمونه با سنگدانه سالم در محیط‌های

مختلف (MPa)

| نوع محیط | نام نمونه | ۱۴ روزه | نسبت مقاومت به مقاومت نمونه سالم | نام نمونه | ۲۸ روزه | نسبت مقاومت به مقاومت نمونه سالم | ۱۸۰ روزه | نسبت مقاومت به مقاومت نمونه سالم |
|----------|-----------|---------|----------------------------------|-----------|---------|----------------------------------|----------|----------------------------------|
| سالم | NNF14 | ۵/۹۰ | ۱ | NNF28 | ۶/۲۹ | ۱ | NNF180 | ۶/۸۰ |
| کلریدی | NCF14 | ۶/۲۳ | ۱/۰۶ | NCF28 | ۶/۲ | ۰/۹۸ | NCF180 | ۵/۹۴ |
| سولفاتی | NSF14 | ۶/۲۶ | ۱/۰۶ | NSF28 | ۶/۲۱ | ۰/۹۹ | NSF180 | ۵/۸۵ |

جدول ۱۶- مقاومت خمشی نمونه با سنگدانه ناسالم در محیط

های مختلف (MPa)

| نوع محیط | نام نمونه | ۱۴ روزه | نسبت مقاومت به مقاومت نمونه سالم | نام نمونه | ۲۸ روزه | نسبت مقاومت به مقاومت نمونه سالم | ۱۸۰ روزه | نسبت مقاومت به مقاومت نمونه سالم |
|----------|-----------|---------|----------------------------------|-----------|---------|----------------------------------|----------|----------------------------------|
| سالم | SNF14 | ۵/۳۱ | ۰/۹ | SNF28 | ۶/۶۶ | ۱/۰۶ | SNF180 | ۶/۷۵ |
| کلریدی | SCF14 | ۵/۴۹ | ۰/۹۳ | SCF28 | ۶/۸۷ | ۱/۰۹ | SCF180 | ۶/۲۳ |
| سولفاتی | SSF14 | ۵/۴۹ | ۰/۹۳ | SSF28 | ۶/۷۲ | ۱/۰۷ | SSF180 | ۵/۸۸ |

همانطور که از جداول ۱۲ تا ۱۴ قابل مشاهده است مقاومت خمشی نمونه‌های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سالم با گذشت زمان افزایش می‌یابد. درصد افزایش مقاومت خمشی بعد از سن ۲۸ روز در نمونه با سنگدانه سالم ۵/۴۳ درصد و در نمونه با سنگدانه ناسالم ۱/۳۵ درصد می‌باشد. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های با سنگدانه سالم در محیط کلریدی با گذشت زمان کاهش می‌یابد، میزان این کاهش بعد از سن ۲۸ روز ۴/۲ درصد است. در نمونه با سنگدانه ناسالم ابتدا مقاومت خمشی افزایش می‌یابد اما بعد از سن ۲۸ روز این روند کاهشی است، که میزان آن ۹/۳۲ درصد می‌باشد. ضمناً مقاومت خمشی نمونه‌های با سنگدانه سالم در محیط سولفاتی با گذشت زمان کاهش می‌یابد، میزان این کاهش بعد از سن ۲۸ روز ۵/۸ درصد است. در نمونه با سنگدانه ناسالم ابتدا مقاومت خمشی افزایش می‌یابد اما بعد از سن ۲۸ روز این روند کاهشی است، که میزان آن ۱۲/۵ درصد می‌باشد.

جدول ۱۲- تاثیر گذشت زمان بر مقاومت خمشی تیرهای

منشوری با سنگدانه سالم و ناسالم و در محیط سالم

| نام نمونه (سالم) | مقاومت خمشی (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه | نام نمونه (ناسالم) | مقاومت خمشی (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه |
|------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| NNF14 | ۵/۹۰ | ۰/۹۴ | SNF14 | ۵/۳۱ | ۰/۸ |
| NNF28 | ۶/۲۹ | ۱ | SNF28 | ۶/۶۶ | ۱ |
| NNF180 | ۶/۸۰ | ۱/۰۸ | SNF180 | ۶/۷۵ | ۱/۰۱ |

جدول ۱۳- تاثیر گذشت زمان بر مقاومت خمشی تیرهای

منشوری با سنگدانه سالم و ناسالم و در محیط کلریدی

| نام نمونه (سالم) | مقاومت خمشی (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه | نام نمونه (ناسالم) | مقاومت خمشی (MPa) | نسبت مقاومت به مقاومت ۲۸ روزه |
|------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| NCF14 | ۶/۲۳ | ۱/۰۴ | SCF14 | ۵/۴۹ | ۰/۸ |
| NCF28 | ۶/۲ | ۱ | SCF28 | ۶/۸۷ | ۱ |
| NCF180 | ۵/۹۴ | ۰/۹۶ | SCF180 | ۶/۲۳ | ۰/۹۱ |

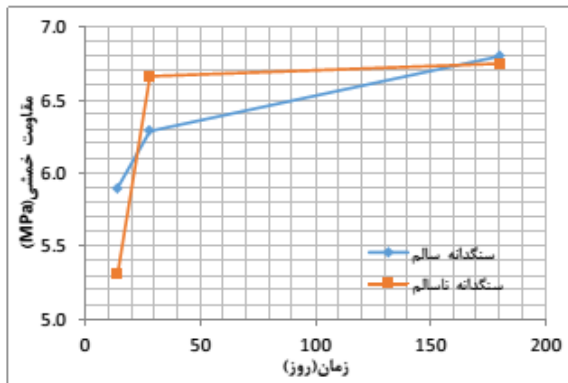
در ضمن قابل مشاهده است مقاومت نمونه با سنگدانه سالم در محیط سولفاتی، در ابتدا بیش از نمونه ناسالم است در سن ۲۸ روز مقاومت نمونه ناسالم از نمونه سالم بیشتر می‌شود، اما با گذشت زمان در هر دو حالت شاهد کاهش مقاومت هستیم که میزان این کاهش در نمونه با سنگدانه ناسالم بیشتر از نمونه با سنگدانه سالم است.



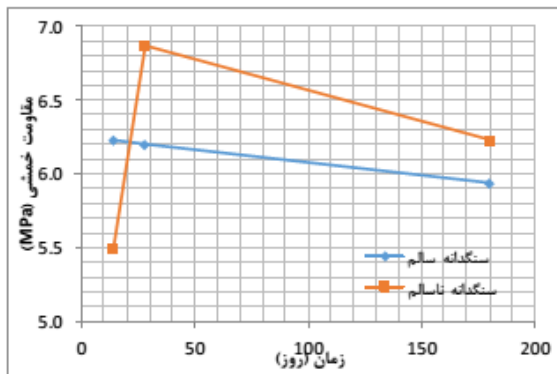
شکل ۱۲- تاثیر محیط بر مقاومت خمشی نمونه‌ها در طول زمان

همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت خمشی نمونه با سنگدانه سالم در محیط کلریدی و سولفاتی در ابتدا بیش از محیط سالم است اما با گذشت زمان مقاومت خمشی در محیط سالم افزایش می‌یابد و در محیط کلریدی و سولفاتی کاهش می‌یابد، که میزان کاهش در محیط سولفاتی بیش از محیط کلریدی می‌باشد. همچنین مطابق شکل مقاومت خمشی نمونه با سنگدانه ناسالم در محیط کلریدی و سولفاتی نیز در ابتدا بیش از محیط سالم است اما با گذشت زمان مقاومت خمشی در محیط سالم افزایش می‌یابد و در محیط کلریدی و سولفاتی کاهش می‌یابد، که میزان کاهش در محیط سولفاتی مانند سنگدانه سالم بیش از محیط کلریدی می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر نوع سنگدانه بر خواص مکانیکی بتن، دو نوع سنگدانه (سالم و ناسالم) با میزان سولفات بیش از حد مجاز (در نظر گرفته شد. مقادیر مقاومت خمشی حاصل از آزمایشات که نشان‌دهنده تاثیر نوع سنگدانه می‌باشد و همچنین مقایسه میزان مقاومت خمشی نمونه با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سالم، کلریدی و سولفاتی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

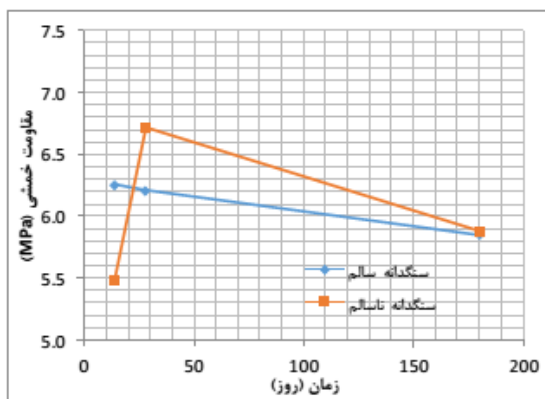
همان‌طور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است مقاومت نمونه با سنگدانه سالم در ابتدا بیش از نمونه ناسالم است در سن ۲۸ روز مقاومت نمونه ناسالم از نمونه سالم بیشتر می‌شود، اما با گذشت زمان روند افزایش مقاومت نمونه با سنگدانه سالم بیش از نمونه با سنگدانه ناسالم می‌شود. همچنین مقاومت نمونه با سنگدانه سالم در محیط کلریدی در ابتدا بیش از نمونه ناسالم است در سن ۲۸ روز مقاومت نمونه ناسالم از نمونه سالم بیشتر می‌شود، اما با گذشت زمان در هر دو حالت شاهد کاهش مقاومت هستیم که میزان این کاهش در نمونه با سنگدانه ناسالم بیشتر از نمونه با سنگدانه سالم است.



الف- محیط سالم



ب- محیط کلریدی



ج- محیط سولفاتی

شکل ۱۳- مقاومت خمشی نمونه سالم و ناسالم در محیط سولفاتی در طول زمان

۶- نتیجه گیری

با ساخت ۴۸ نمونه مکعبی فشاری و ۳۰ عدد نمونه تیر منشوری بتنی غیر مسلح با طرح اختلاط مشخص با دو نوع سنگدانه سالم و ناسالم مستعد واکنش قلیایی انبساطی و نگهداری در سه محیط متفاوت سالم آب شرب، و محیط های ناسالم شبیه سازی شده کلریدی و سولفاتی به مدت ۶ ماه، مقاومت فشاری و خمشی در زمان های متفاوت اندازه گیری شد و تاثیر پارامترهای مختلف زمان، سنگدانه و نوع محیط بررسی گردید و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با گذشت زمان در محیط سالم، افزایش مقاومت فشاری سریع همه نمونه ها تا ۲۸ روز و نرخ رشد کندتر تا چهار و نیم ماه مشاهده شد. گرچه در دوره اولیه، مقاومت نمونه ها با سنگدانه ناسالم کمی بیش از سنگدانه سالم بود ولی با گذشت زمان و در سن ۱۸۰ روزگی، مقاومت فشاری نمونه های با سنگدانه ناسالم کاهش پیدا کرد.

۲- مقاومت فشاری نمونه های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط کلریدی و سولفاتی تا سن تقریباً ۱۰۰ روز افزایشی بوده و بعد از آن، مقاومت فشاری نمونه های با سنگدانه سالم محیط کلریدی ثابت و در محیط سولفاتی تا ۲٪ کاهش یافته، در حالی که مقاومت فشاری نمونه های با سنگدانه ناسالم بخصوص در محیط سولفاتی کاهش شدید داشته است که نشان از کاهش ۱۳ و ۲۴ درصدی ناشی از مصالح و محیط نامساعد بخصوص تاثیر شدید منفی محیط مخرب سولفاتی می باشد که این اثر مخرب در درازمدت شدت خواهد گرفت و عمر مفید سازه را به شدت کاهش می دهد.

۳- مقاومت خمشی نمونه های با سنگدانه سالم و ناسالم در محیط سالم با گذشت زمان افزایش می یابد. درصد افزایش مقاومت خمشی بعد از سن ۲۸ روز در نمونه با سنگدانه سالم ۵/۴۳ درصد و در نمونه با سنگدانه ناسالم ۱/۳۵ درصد می باشد.

۴- مقاومت خمشی نمونه های با سنگدانه سالم در محیط کلریدی با گذشت زمان کاهش می یابد، میزان این کاهش بعد از سن ۲۸ روز ۴/۲ درصد است. در نمونه با سنگدانه ناسالم ابتدا مقاومت خمشی افزایش می یابد اما بعد از سن ۲۸ روز این روند کاهشی است، که میزان این کاهش ۹/۳۲ درصد می باشد.

۵- مقاومت خمشی نمونه های با سنگدانه سالم در محیط سولفاتی با گذشت زمان کاهش می یابد، میزان این کاهش بعد از سن ۲۸ روز ۵/۸ درصد است. در نمونه با سنگدانه ناسالم ابتدا مقاومت خمشی افزایش می یابد اما بعد از سن ۲۸ روز این روند کاهشی است، که میزان آن ۱۲/۵ درصد می باشد. میزان کاهش در محیط سولفاتی بیش از محیط کلریدی می باشد. ضمناً کاهش مقاومت خمشی نمونه با سنگدانه ناسالم در محیط سولفاتی مانند سنگدانه سالم بیش از محیط کلریدی می باشد. ضمناً مقاومت خمشی نمونه ها با سنگدانه و محیط سالم دارای رشد بیش از ۱۵ درصدی بعد از ۶ ماه بوده اند.

۷- مراجع

- [۱]. تدین، محمدحسین و همکاران، ۱۳۸۸، "پیشنهاد معیار نفوذپذیری بتن در برابر گاز برای ارزیابی دوام بتن"، اولین کنفرانس ملی بتن.
- [۲]. نوبل، آدام، خواص بتن، مترجم فامیلی هرمز، ۱۳۷۸.
- [3]. Swamy, R.N., Al-Asali, M. M., "Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction." *ACI Materials Journal* 85.5 (1988): 367-374.
- [4]. Fan, S., Hanson, J.M., "Effect of alkali silica reaction expansion and cracking on structural behavior of reinforced concrete beams." *ACI Structural Journal* 95.5 (1998).
- [5]. Hamada, Hidenori, et al. "Influence of protective surface coating on the structural behaviour of ASR-affected RC beams under sustained loading." , *ACI Structural Journal*, 2004.
- [6]. Multon, S., Seignol, J.F., Toutlemonde, F., "Structural behavior of concrete beams affected by alkali-silica reaction." *ACI materials journal* 102.2 (2005).
- [7]. Ganjian, E., Sadeghi Pouya, H., "The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag." *Construction and Building Materials* 23.2 (2009): 644-652.
- [۸]. کربلائی فرجی، حسین، ۱۳۸۳، "دوام بتن مسلح حاوی پوزولانهای مختلف در شرایط محیطی دریاچه ارومیه"، ششمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی.

[۹]. افشین، حسن، ۱۳۸۸، " بررسی دوام بتن مسلح در محیط دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا"، نشریه مهندسی دریا.

[۱۰]. رمضانپور علی اکبر، حاجی قاسمعلی سعید، ۱۳۸۹، " اثر توام واکنش قلیایی سیلیسی و خزش بر تیرهای خمشی بتن مسلح"، دومین کنفرانس ملی بتن ایران.

[۱۱]. سلطانی، حسن، ۱۳۹۱، " بررسی تاثیر محیطهای سولفات و کلریدی بر خواص مکانیکی بتنهای حاوی متاکاولین"، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن .

[12]. Prezzi, M., Monteiro, P.J.M, Sposito, G., "The alkali-silica reaction, Part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels." *ACI Materials Journal* 94.1 (1997): 10-17.

[13]. Hajighasemali, S. Ramezaniapour, A.A. , "Longitudinal Expansion of Reinforced Concrete Beams Subjected to Alkali-Silica Reaction", *Amirkabir Journal of Science and Technology*, Vol. 19, No. 69-C, Fall 2008-Winter 2009

[۱۴]. حاجی قاسمعلی، سعید، رمضانپور، علی اکبر، لطفی، وحید، کاشفی زاده، محمد حسین، ۱۳۹۶، " بررسی اثر واکنش قلیایی - سیلیسی بر رفتار سازههای تیرهای بتنی مسلح با استفاده از روش المان محدود"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹ شماره ۱ صفحات ۲۳ تا ۳۳.

[15]. Multon, S., Toutlemonde, F., 2010, "Effect of Moisture Conditions and Transfers on Alkali-silica Reaction Damaged Structure", *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 924-934 .

Experimental evaluation of mechanical characteristics and durability of concrete specimens under combination of chloride-sulfate environment conditions and sulfate aggregate

M. K. Sharbatdar*

Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

A. Habibi

M.Sc, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In this paper, In addition to considering the different environmental conditions (sulfate, chloride and normal environment) and long-term effects on the concrete, effect of unhealthy sulfate aggregate due to high sulfate levels were assessed. For this purpose, 48 compressive cubic concrete specimens and 30 rectangular beam were made with specific mix design and cured for 6 months at simulated environments, then compressive and flexural strength tests were conducted. Results indicated that the compressive strengths of all specimens at the healthy environment were increased but the strengths of specimens with sulfate aggregates were decreased. Effect of unhealthy aggregate on reducing compressive strength of concrete specimens was more negative in comparison with unsuitable environment and also the strengths were reduced more than 10 percent under combined effects until 6 months while the strength of concrete with healthy aggregate and environment indicated an increase more than 20 percent. The compressive strengths both aggregates at chloride and sulfate environment were increased up to 3 months but the strengths of concrete specimens with sulfate aggregate and sulfate environment were rapidly decreased up to 24%. Negative effect of unhealthy aggregate and environment on reducing flexural strength was more than that of compressive strength. The flexural strengths of specimens at chloride and sulfate environment were not decreased up to 28 days but the strengths were respectively decreased more than 6 and 13% at chloride and sulfate environment while this strength was increased up to 15% at concrete specimens with healthy aggregate and environment.

Keywords: Durability, flexural strength, compressive strength, chloride, sulfate.

* Corresponding Author: msharbatdar@semnan.ac.ir

