مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۷- شماره ۲ - سال ۱۴۰۱
www.ElitesJournal.ir

تاثیر پودر صدف معدنی بر خود ترمیمی ترکها با استفاده از جذب دی اکسید کربن و کربناته شدن در بتن های روسازی جاده‌ای

سید رحیم بهارآور

استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی شمس، گنبدکاووس،ایران

Seyedbah80@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ پذیرش: خرداد ماه ۱۴۰۱

چکیده

هر در این تحقیق با توجه به اینکه بتنهای آسفالتی از لحاظ محیط زیستی آسیبهای زیادی به طبیعت و منابع ملی وارد می کنند تصمیم گرفتیم بتن جایگزین آن را بررسی کنیم. در این مسیر از ماده ای معدنی به نام پودر صدف که دارای کلسیم بالایی می باشد به عنوان افزودنی استفاده نمودیم تا از طرفی به علت بالا بود کلسیم اکسید و جذب بالای دی اکسید کربن هم در چرخه پاکسازی محیط زیست قدم برداریم و هم اینکه با افزایش کربناته شدن در بتن و تشکیل کربنات کلسیم به خودترمیمی ترکهای موجود در راههای با رویه بتن غلطکی بپردازیم . برای حصول نتیجه وکم کردن فاکتورهای متغیر تاثیر گزار همه مصالح غیر از پودر صدف را ثابت گرفته و پودر صدف را به مقدارهای ۵، ۱۰،۱۵و ۲۰ درصد وزن سیمان به بتن اضافه نمودیم سپس بر اساس ASTM C 1040 برای مدل سازی و تراکم هرچه بهتر، نمونه بتنی ۱متر در ۲ متر به ضخامت ۲۵ سانتیمتر با اسلامپ صفر را تهیه و غلطک نمودیم و از بتن موجود در ۱،۷،۲۸ و ۵۶ روزگی با مغزه گیری آزمونه ها را استخراج و تحت آزمایش مقاومت فشاری ، ذوب و انجماد و کربناته شدن قرار دادیم و همچنین با روش اعمال نیروی پیش ترک با اعمال ۶۰ درصد نیروی گسیختگی بتن، ترکهایی به اندازه ۱۵ الی ۲۰ میکرون در بتنها ایجاد و با قرار دادن در مخزن دی اکسید کربن طبق EN BS 13295:2004 کربناته شدن سریع را اعمال نموده و نتایج آخودترمیمی را طبق ازمایش مربوطه ثبت نمودیم. با توجه به آزمایشها، نمونه بتنی حاوی ۱۰ درصد پودر صدف معدنی از لحاظ همبستگی ایده آل ترین ترکیب موجود بود چرا که با در نظر گرفتن تمام پارامتره مانند مقاومت و دوام و خودترمیمی، این نمونه از لحاظ میانگین بازدهی بهترین رفتار را از خود نشان داد و نمونه های ۱۵و ۲۰ درصد علی رغم بالا بودن کربناته شدن و متعاقبا صعودی بودن کربناته شدن افت شدیدی در مقاومت ثبت شده با آزمایش اولتراسونیک از خود نشان دادند.

کلمات کلیدی: کربناته شدن، پودر صدف، خودترمیمی بتن، بتن غلطکی

۱– مقدمه

مسلما در دهه های اخیر یکی از مواردی که مورد توجه بشریت بوده است آلودگیهای زیست محیطی بوده که خطری برای نسلهای بعدی به شمار می آید. مهندسین عمران نیز به نوبه خود در صدد آن هستند تا نقشی در کنترل این آلودگیها ایفا نمایند. متاسفانه صنعت سیمان بعد ا از وسایل نقلیه بیشترین سهم آلودگی را در دنیا با تولید دی اکسید کربن حاصل از سوختها و تبدیل کربنات کلسیم به اکسید کلسیم در کوره ها بر دوش می کشد که این آسیب به محیط زیست با تبدیل کوهها یعنی معادن سنگ آهک به

دشت صد چندان می شود. اکثر کشورهای اروپایی و آمریکایی برداشت معدن را متوقف و شروع به خرید کلینکر از کشورهای جهان سوم می نمایند تا فقط با آسیاب آن هم ارزش افزوده حاصله را از آن کشورها بگیرند و هم اینکه به منابع نسلهای بعدی خود دست درازی نکنند. به هر حال با توجه به سیاستهای موجود اعمال چنین رویه ای برای ما بسیار دشوار است لذا حداقل می توانیم از عمل کربناته شدن که به نوعی جذب دی اکسید کربن هوا و تکرار چرخه تبدیل اکسید کلسیم موجود در سیمان به کربنات کلسیم یا همان سنگ آهک است را در جهت پاکسازس ایجاد و قدمی مثبت برداریم. با این اندیشه در نظر گرفتیم تا از منابع دیگری که در زمانهای بسیار طولانی در حاشیه دریای خزر در قسمتهای مرزی اینچه برون به نام صدفهای معدنی به وجود آمده اند در جهت افزایش جذب دی اکسید کربن به واسطه اکسید کلسیم بالای آن بهره ببریم. همچنین بتوانیم با جذب دی اکسید کلسیم بیشترمقدار کربناته شدن را افزایش داده و در نتیجه با کربناته شدن حداکثری نتیجه بهتری از خود ترمیمی در ترکهای میکرونی روسازی های بتنی حاصل نماییم.

۱-۱- پودر صدف معدنی

صدف معدنی از مناطق دریایی که در طول تاریخ دارای مقادیر زیادی صدف و مرجان انباشته شده بوده اند و اکنون به صورت فسیل در آمده اند برداشت می شود. این محصول بیشتر در استان های گلستان، شهرستان گنبدکاووس، منطقه آق بند به دست می آید. امروزه این صدف را به نام های صدف فسیل،کوهی میشناسند. این صدفها در کارخانه های تولید پودر صدف معدنی بعد از آسیاب شدن به حالت ریز دانه درآمده و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرد.

شکل۱- تصویر صدف معدنی

این صدف ها بر اساس اندازه آنها به ۴ دسته کلی تقسیم می شود[۱]:

- ✓ صدف معدنی گرانولی با ۲.۵- ۴.۵ میلی متر
- ✓ صدف معدنی شکری با ۱-۳ میلیمتر
- ✓ صدف معدنی مش ۴۰۰
- ✓ صدف معدنی پودری اندازه ۰.۱ میلیمتر و کوچکتر

صدف های معدنی با دارا بودن مقادیر قابل توجهی کلسیم به میزان تقریبی چهل درصد از عمده ترین منابع تامین کننده کلسیم در تمام صنایع از جمله دارو سازی ، مواد غذایی. صنایع ساختمانی و غیره می باشد.

۲- کربناته شدن

اجزای اصلی کلینکر سیمان سیلیکات هایی مانند سیلیکات تری کلسیم (C3S)، سیلیکات دی کلسیم (C2S) و آلومینات هایی مانند آلومینات تری کلسیم (C3A)، آلومینوفریت تترا کلسیم (C4AF) هستند. سیمان به غیر از این اجزای اصلی حاوی

اکسیدهایی مانند CaO، MgO، SO3، Na2O، K2O نیزاست. هیدرات های سیلیکات (C-S-H) و هیدرات های آلومینات (C-A-H) در نتیجه ترکیب سیلیکات ها و آلومینات ها با آب تشکیل می شوند. همچنین C-H از هیدراتاسیون سیلیکات ها آزاد می شود، این آهک آزاد یک محیط بازی ایجاد می کند و از آرماتور در برابر خوردگی در بتن مسلح محافظت می کند. کربناته شدن آهک آزاد که از قسمت سطح بتنی درمجاورت CO2 شروع می شود، سختی سطحی بتن راافزایش داده و در آب نامحلول می شود. وقتی آهک های آزاد کربناته نشده در مجاورت آب قرار می گیرد در آب حل شده و ایجاد فضای خالی می نمایند. بدین ترتیب دوام و مقاومت بتن کاهش می یابد. ولی از طرفی دیگر بتن که به لطف ترکیب قلیایی خود با دستور العملی ساده از آرماتورهای بتن مسلح در برابر خوردگی محافظت می کند، به مرور زمان با کربناته شدن این کیفیت را از دست می دهد. علت از بین رفتن قلیاییت، تبدیل محصولات هیدراتاسیون سیمان به ویژه Ca(OH)2 به نمک خنثی CaCO3 از طریق ترکیب با گاز CO2 هوا می باشد و این پدیده بر عمر مفید سازه های دارای آرماتور تاثیر منفی دارد[۲]. در اثر تماس هیدروکسید کلسیم با دی اکسید کربن موجود در هوا، کربنات کلسیم (CaCO3) تشکیل شده و مقداری آب نیز آزاد می شود.

$$Ca(OH)2+CO2\rightarrow CaCo3+H2O \quad (۱)$$

۲-۱- خود ترمیمی در بتن

خودترمیمی در بتن اغلب از پر شدن و بسته شدن ترک ها حاصل می شود. هنگامی که ترک ها بسته می شوند، مقاومت بتن در مقایسه با بتن شاهد افزایش می یابد و یا نقطه ضعفهای بتن را از لحاظ دوام التیام می بخشد. ترمیم در بتن بر مقاومت و دوام تأثیر دارد. همانطور که در قسمت قبل گفتیم ۳ روش برای بازیابی بتن وجود دارد[۲].

۱. روش طبیعی
۲. روش مهندسی
۳. روشی که در آن مهندسی و روش طبیعی به طور مشترک استفاده می شود.

اصلی ترین واکنشی که بر ترمیم ترک بتن ها تأثیر می گذارد، کربناته شدن است. همانطور که در قسمت کربناتاسیون گفته شد دی اکسید کربن با کلسیم اکسید موجود در سیمان و یا هر ماده افزودنی که به بتن اضافه می کنیم وارد واکنش شیمیایی طبق مراحل زیر می گردد و کربنات کلسیم حاصله موجب پوشش ترکهای میکرونی سطحی و عمقی می شود. هنگامی که دی اکسید کربن و آب با هم ترکیب می شوند (باران اسیدی)، اسید H2CO3 (اسید کربنیک) تشکیل می شود. این اسید از طریق ترکهای مویین به داخل بتن نفوذ می کند و دوباره با CaO که جزء سیمان است واکنش می دهد و معادله ۵ ظاهر می شود.

$$H2O + CO2\rightarrow H2CO3 \quad (۲)$$

$$CaO + H2O\rightarrow \quad Ca(OH)2 \quad (۳)$$

$$H2CO3+Ca(OH)2\rightarrow CaCO3+ 2H2O \quad (۴)$$

$$H2CO3 + \ CaCO3\rightarrow Ca(HCO)3 \quad (۵)$$

در معادلات ۲ تا ۵ می توانیم مراحل تشکیل کربناته شدن را ببینیم. کربنات کلسیم ماده ای است که در نتیجه کربناته شدن تولید می شود. از آنجایی که این ماده در آب حل نمی شود و در اطراف ترک ها ایجاد می شود، بتن را آب بندی می کند و با بهبود ترک ها، سختی و استحکام سطح را بهبود می بخشد [۳].

۲-۲- بتن غلطکی

بتن غلطکی یا بتن Roller Compacted Concrete عبارت است از بتنی با اسلامپ تقریبی صفر که در کشورهای کانادا و امریکا از سالیان دور در روسازی بتنی جاده ها مورد استفاده بوده است. اخیرا نیز در ایران به علت گران شدن قیر در بعضی مناطق از جمله استان گلستان، تهران و آذربایجان شرقی از این بتن روسازی به صورت محدود استفاده شده است.

بتن غلتکی دارای همان ماده اولیه بتن معمولی یعنی سیمان، آب و سنگدانه ها مانند شن یا ماسه است. اما بر خلاف بتن معمولی، این مخلوط همانطور که اشاره شد به اندازه‌ای سفت و خشک است که توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم می شود. این بتن مزایای بسیاری مانند سرعت در عمل، اقتصادی بودن آن و مقاومت بالا دارد ولی از عمده عواملی که در این مقاله به آن پرداخته ایم نقش این جاده ها به علت سطح تماس آنها به هوای محیط بوده است که می تواند دی اکسید کلسیم را جذب و علاوه بر خودترمیمی در پاکسازی آب و هوا نیز نقش مهمی ایفا نماید[۴-۵].

۳- مصالح اختلاط و روش آزمایش

۳-۱- مصالح

مواد و مصالح مصرفی در بتنهای غلطکی همانطور که قبلا نیز اشاره شد همانند مصالح بتنهای معمولی می باشد ولی به دلیل اهداف تعیین شده در این مقاله ما از ماده افزودنی پودر صدف معدنی نیز به عنوان جایگزین سیمان استفاده خواهیم نمود. طی پیش آزمایشهای انجام شده با توجه به ASTM C 109 [۶] نمونه های فشاری ما در ترکیب ملات سیمان با پودر صدف در سن ۲۸ روزگی ۹۰ درصد مقاومت سیمان تنها را داشته است لذا میتوانیم به عنوان پوزولان نیز از آن نام ببریم.

۳-۱-۱- سیمان

در این مقاله از سیمان تیپ ۲ کارخانه پیوند گلستان استفاده شده است که مشخصات آن در جدول شماره ۱ داده شده است.

جدول ۱- آنالیز سیمان پیوند

اکسیدهای موجود	نتایج سیمان پیوند ٪	دامنه استاندارد(ISIRI – 389)
SiO2	۸/۲۰	Min 20.00
Al2O3	۲/۵	Max 6.00
Fe2O3	۶۵/۳	Max 6.00
CaO	۶۳.۳	Max 75
MgO	۱.۸	Max 5.00
SO3	۲.۵	Max 3.00
باقیمانده نامحلول	۰.۳	Max 0.75
کاستگی گرمایی	۲.۱	Max 3.00

۳-۱-۲- سنگدانه

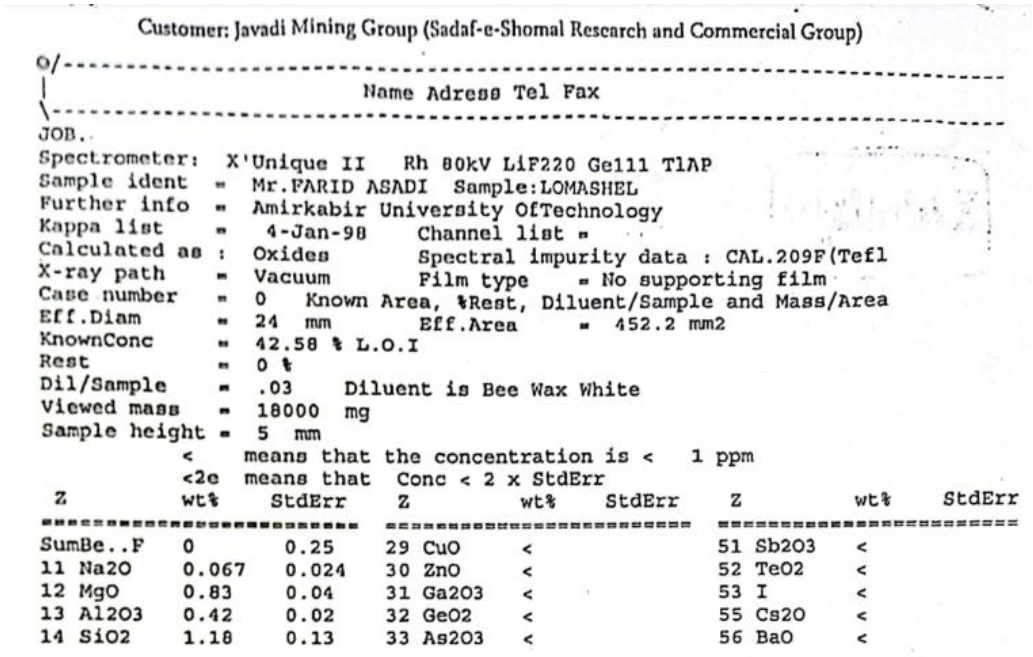
سنگدانه مورد استفاده از نوع رودخانه ای بوده است تا یتوانیم نسبت به اسلامپ صفر یتن غلطکی بهترین تراکم را با غلطک زدن تا وزن ۲۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب حاصل نماییم. ماکسیمم اندازه سنگدانه طبق ACI را ۱۹ میلیمتر در نظر گرفته و کل دانه بندی مطابق جدول زیر به صورت متصل طراحی گردید.

جدول ۲- درصد سنگدانه مصرفی

سنگدانه ۱۱ الی ۱۹ میلیمتر	سنگدانه ۸ الی ۱۱ میلیمتر	سنگدانه ۴.۷۶ الی ۸ میلیمتر	سنگدانه ۰ الی ۴.۷۴ میلیمتر
٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۴۰

۳-۱-۳- پودر صدف معدنی

پودر صدف در بتن مورد نظر جایگزینی برای سیمان به عنوان چسباننده می باشد و ازکارخانه تولید پودر سیلیس جوادی در گنبد کاووس تهیه شده است. مشخصات پودر صدف استفاده شده به شرح شکل ۲ می باشد.



Customer: Javadi Mining Group (Sadaf-e-Shomal Research and Commercial Group)

Name Adress Tel Fax

JOB..
Spectrometer: X'Unique II Rh 80kV LiF220 Ge111 TlAP
Sample ident = Mr.FARID ASADI Sample:LOMASHEL
Further info = Amirkabir University OfTechnology
Kappa list = 4-Jan-98 Channel list =
Calculated as : Oxides Spectral impurity data : CAL.209F(Tefl
X-ray path = Vacuum Film type = No supporting film
Case number = 0 Known Area, %Rest, Diluent/Sample and Mass/Area
Eff.Diam = 24 mm Eff.Area = 452.2 mm2
KnownConc = 42.58 % L.O.I
Rest = 0 %
Dil/Sample = .03 Diluent is Bee Wax White
Viewed mass = 18000 mg
Sample height = 5 mm
< means that the concentration is < 1 ppm
<2e means that Conc < 2 x StdErr

Z	wt%	StdErr	Z	wt%	StdErr	Z	wt%	StdErr
SumBe..F	0	0.25	29 CuO	<		51 Sb2O3	<	
11 Na2O	0.067	0.024	30 ZnO	<		52 TeO2	<	
12 MgO	0.83	0.04	31 Ga2O3	<		53 I	<	
13 Al2O3	0.42	0.02	32 GeO2	<		55 Cs2O	<	
14 SiO2	1.18	0.13	33 As2O3	<		56 BaO	<	

شکل۲- آنالیز پودر صدف کارخانه جوادی

۳-۱-۴- آب اختلاط

آب مورد استفاده در اختلاط و عمل آوری بتن غلطکی، آب شهری و قابل شرب شهر گنبد کاووس می باشد که آنالیز آن طبق استاندارد شماره ۱۰۵۳ سازمان ملی استاندارد در جدول ۳ داده شده است.

جدول ۳- آنالیز آب مصرفی

نوع ترکیب	نام شیمیایی	حداکثر مطلوب	حداکثر مجاز	نتیجه آزمایش
کل مواد جامد محلول	TDS	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۹۰۰
سختی کل	CaCo3	۲۰۰	۵۰۰	۱۸۵
کلرور	Cl	۲۵۰	۴۰۰	۲۳۵
سولفات	SO4	۲۵۰	۴۰۰	۲۵۵
منگنز	Mn	۰.۱	۰.۴	۰.۰۹
آلومینیوم	Al	۰.۱	۰.۲	۰.۰۸
آمونیاک	NH3	۱.۵	-	۱.۱
نیتریت	NO2	-	۳	۲.۱

۴- طرح اختلاط

با توجه به مصالح و مواد مورد استفاده و آیین نامه ACI، جدول ۴ طرح اختلاط را به نسبت مصالح مصرفی مشخص می نماید. طبق این جدول تمام مواد و مصالح به غیر از پودر صدف ثابت می باشد تا بتوانیم روی تاثیر این ماده در بتن تمرکز داشته و تحلیلهای دقیق تری ارایه نماییم.

شکل۴- جدول طرح اختلاط بتن

نام نمونه	سیمان kg/m3	سنگدانه ۰- ۴.۷۶	سنگدانه ۴.۷۶- ۰.۸	سنگدانه ۰.۸- ۱۱	سنگدانه ۱۱- ۱۹	مقدار آب به نسبت سیمان	پودر صدف معدنی ٪ سیمان
RCP0	۳۵۰	٪۴۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۵	۰
RCP5	۳۵۰	٪۴۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۵	۵
RCP10	۳۵۰	٪۴۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۵	۱۰
RCP15	۳۵۰	٪۴۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۵	۱۵
RCP20	۳۵۰	٪۴۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۵	۲۰

همانطور که از موضوع پژوهش نیز مشخص است هدف اصلی بررسی تاثیر پودر صدف معدنی بر میزان کربناته شدن می باشد لذا ما باید عمل کربناته شدن را که پروسه ای چند ماهه و گاهاچند ساله است را به صورت تسریع شده انجام دهیم. لذا با توجه به EN BS 13295:2004 مخزن تسریع کربناته شدن به صورت شکل ۳ تهیه گردید[۷].

شکل ۳- تصویر مخزن دی اکسید کربن

دو قالب بتنی با ضخانت ۲۵ سانتیمتر و طول و عرض ۱۰۰ در ۲۰۰ سانتیمتر ریخته شده و سپس به وسیله دستگاه مغزه گیر نمونه های استوانه ای ۱۰ cm در ۲۰ cm مغزه گیری می شود که این نمونه ها برای تعیین مقاومت فشاری و همچنین مقدار کربناته شدن و خود ترمیمی طبق روش زیر مورد آزمایش قرار می گیرد.

نمونه ها از بتن مورد نظر به روش مغزه گیری استخراج می شوتد و در سنین مورد نظر تحت مقاومت فشاری و ذوب و انجماد قرار می گیرند. برای انجام آزمایش کربناته شدن نمونه ها طبق EN BS 13295:2004 [۷] در مخزن مخصوصی که در شکل ۳ مشاهده می شود با دی اکسید کربن ثابت ۳ درصد نگهداری و در سن مورد نظر آزمایش کربناته شدن اعمال می گردد. برای آزمایش خودترمیمی در مرحله اول نمونه ها ایتدا تحت آزمایش التراسونیک قرار گرفته و مقاومت آنها ثبت می گردد در مرحله دوم نمونه ها با ۶۰ درصد مقاومت شکست خود که از آزمایش جک فشاری نتیجه گیری شده است زیر جک قرار داده می شوند. در مرحله سوم دوباره آزمایش التراسونیک بر نمونه های ترک خورده اجرا و مقاومت بر حسب التراسونیک ثبت می گردد. در مرحله چهارم نمونه ها به مدت ۵۶ روز در محفظه اکسید کربن قرار گرفته و بعد از اتمام دوره آزمایش دوباره با التراسونیک اندازه گیری و مقاومت آنها با مراحل قبلی مقایسه می شود.

۴-۱- آزمایشهای مورد نظر

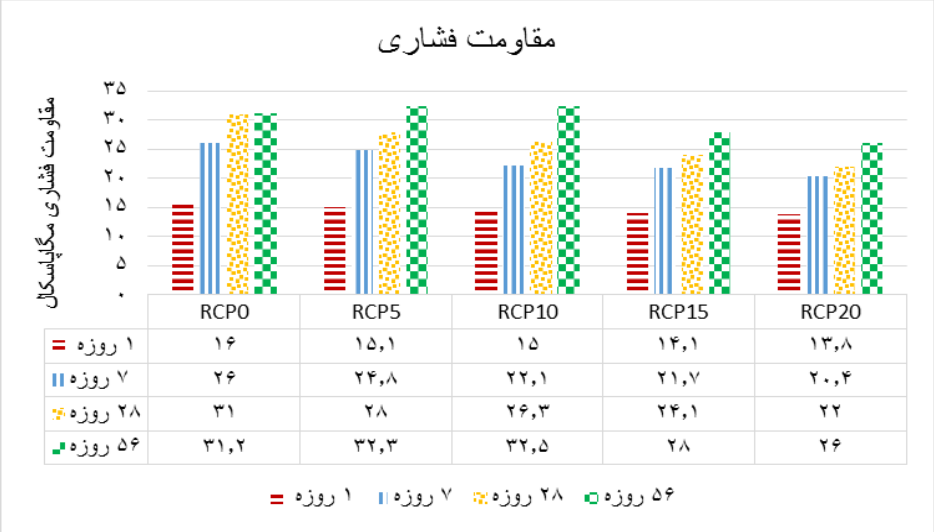
همانطور که در بند قبلی اشاره شد در این مقاله آزمایشهای مقاومت فشاری و کربناته شدن و همچنین خود ترمیمی ترکهای بتنی مورد مطالعه قرار می گیرند که نتایج مقاومت فشاری برای ۱، ۷، ۲۸و ۵۶ روزگی، ذوب و انجماد ۵۶ روزگی، کربناته شدن و خودترمیمی نیز به علت نیاز به کربناته شدن طبق استاندارد در ۵۶ روزگی اعمال و ثبت می گردند.

۵- نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آنها

نتایج نمونه ها بعد از اعمال آزمایشها در سنین مورد نظر ثبت و نمودار آنها در صفحات پیش رو ارایه گردیده است.

۵-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق ASTM C 39 انجام وداده ها در شکل ۴ قابل رویت است[۸].



	RCP0	RCP5	RCP10	RCP15	RCP20
۱ روزه	۱۶	۱۵,۱	۱۵	۱۴,۱	۱۳,۸
۷ روزه	۲۶	۲۴,۸	۲۲,۱	۲۱,۷	۲۰,۴
۲۸ روزه	۳۱	۲۸	۲۶,۳	۲۴,۱	۲۲
۵۶ روزه	۳۱,۲	۳۲,۳	۳۲,۵	۲۸	۲۶

شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری نمونه های بتنی

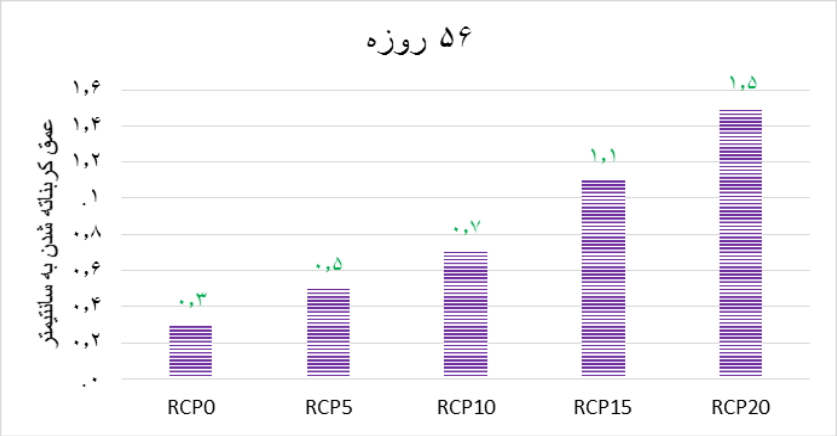
با توجه به شکل ۴ ملاحظه می نماییم که نمونه شاهد RCP0 تا سن ۲۸ روزگی مقاومت فشاری بیشتری نسبت به دیگر نمونه ها که دارای پودر صدف بوده اند از خود نشان داده است و همچنین هرچه مقدار پود صدف نیز افزایش یافته است مقاومت فشاری نیز معکوس عمل کرده و نزولی بوده است. بعد از ۲۸ روزگی خاصیت پوزولانی پودر صدف باعث شده است تا مقاومت به صورت چشمگیری افزایش یابد.

۵-۲- آزمایش کربناته شدن

همانطور که قبلا نیز اشاره شد برای آزمایش کربناته شدن نمونه ها به مدت ۵۶ روز(طبق استاندارد) در محیط مرطوب عمل آوری شده و سپس به مدت ۵۶ روز دیگر در مخزن کربناته شدن سریع قرار گرفتند و بعد از اتمام دوره کربناته شدن (شکل ۵) با محلو فنل فتالین و الکل طبق استاندارد مربوطه تحت آزمایش قرار گرفتند که نتایج مندرج در شکل۶ ثبت گردید.

شکل۵- تصویر نمونه های کربناته شده

در شکل ۶ با توجه به مقدار کربناته شدن در بتنها کاملا مشخص است که هرچه بتنها دارای قابلیت کربناته شدن بیشتری باشند از لحاظ جذب دی اکسید کربن عملکرد بهتری داشته اند.

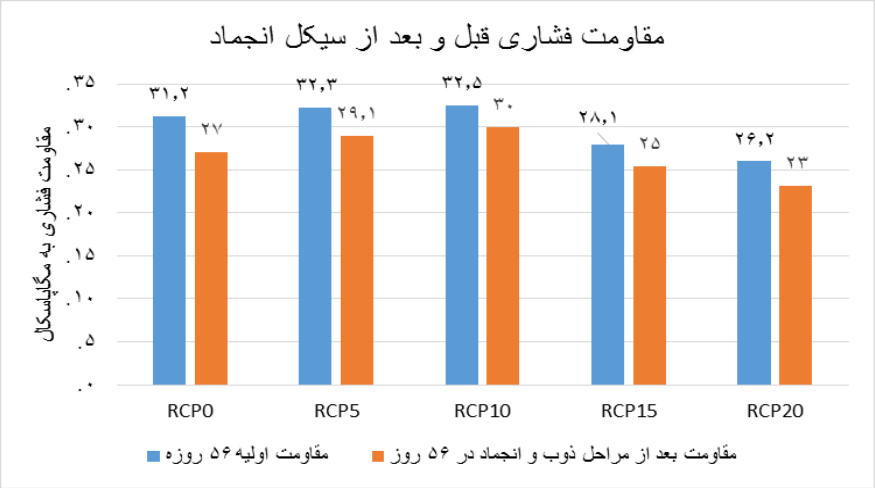


شکل ۶- نمودار مربوط به عمق کربناته شدن

با توجه به شکل ۶ با افزایش مقدار پودر صدف معدنی مقدار کربناته شدن نیز افزایش داشته است و هنگام انجام آزمایش نیز مقدار جذب دی اکسید کربن در روزهای اولیه در حدود ۳ درصد کامل انجام میپذیرفت به عبارتی به علت جذب دی اکسید کربن و پایین آمدن فشار مخزن همه روزه تزریق دی اکسید کربن برای رسیدن به اندازه استاندارد که ۳ درصد کل حجم مخزن بود انجام می شد.

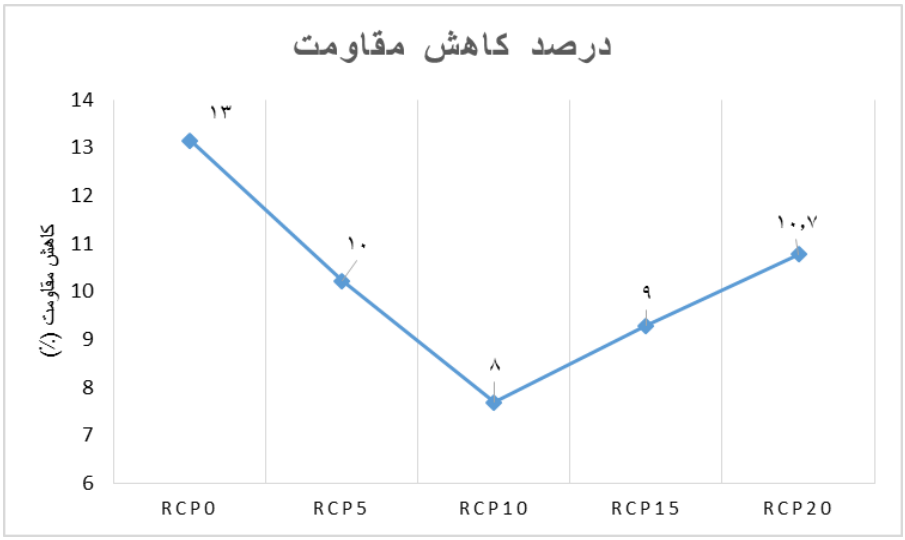
۵-۳- آزمایش ذوب و انجماد

طبق ASTM C 666 [۹] سیکل ذوب و یخبندان بر روی نمونه های ۵۶ روزه انجام و نتایج طبق شکل ۷ ثبت شد.



شکل ۷- نمودار مربوط به سیکل ذوب و انجماد

طبق شکل ۷ نمونه ها بعد از یک دوره ذوب و انجماد وقتی زیر دستگاه مقاومت فشاری قرار گرفته اند مقاومت خود را تا حدودی از دست داده اند که روند مقاومت بعد از سیکل ذوب- انجماد نیز همانند نتایج مقاومت فشاری بوده و بهترین عملکرد را نمونه RCP10 با ۳۰ مگاپاسکال نشان داده است و ضعیفترین آن نمونه RCP20 بوده است.



شکل۸- نمودار مربوط به درصد کاهش مقاومت بتنهای تحت ذوب و انجماد

با توجه به شکل ۸ پودر صدف مقاومت ذوب- یخبندان نمونه ها را افزایش داده است به طوری که در نمونه RCP0 که پودر صدف صفر بوده است افتی معدل ۱۳ درصد داشته ایم که این افت مقاومت در نمونه های دیگر تا ۸ و ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

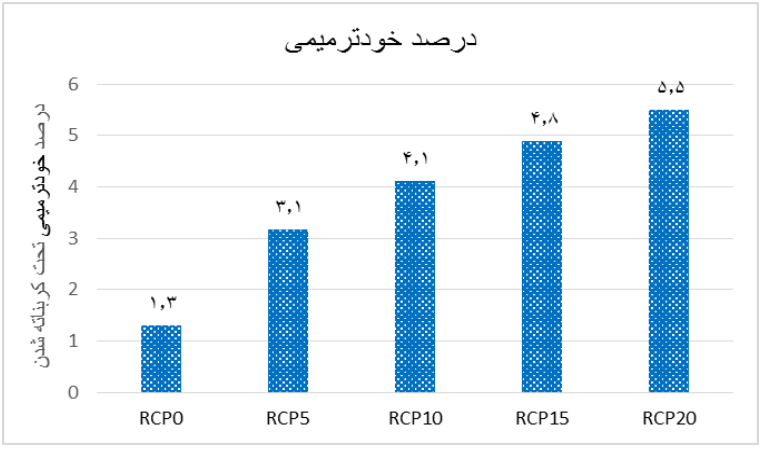
۵-۴- آزمایش خود ترمیمی

همانطور که قبلا نیز اشاره شد مقاومت نمونه ها توسط التراسونیک در ۳ مرحله آزمایش و ثبت گردید که درجدول ۵ داده شده است.

جدول۵- مقدار مقاومت نمونه های بتنی خودترمیمی در سه مرحله آزمایشی

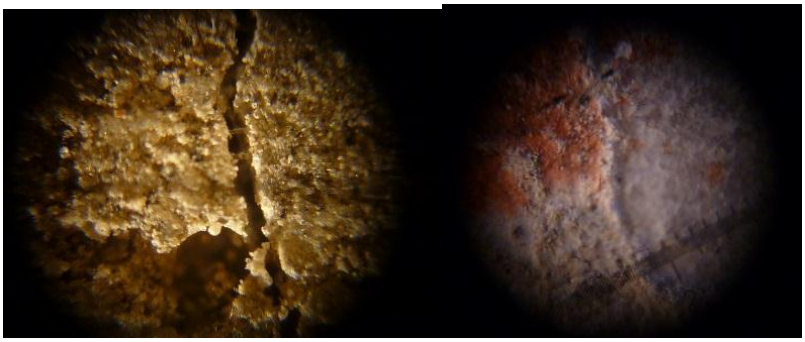
نام نمونه	مقاومت بعد از ۲۸ روز تحت التراسونیک	مقاومت بعد از اعمال ۶۰ درصد نیروی شکست تحت دستگاه التراسونیک	مقاومت بعد از ۵۶ روز کربناته شدن و خودترمیمی
RCP0	۳۰.۵	۲۳	۲۳.۳
RCP5	۲۶.۸	۲۲.۱	۲۲.۸
RCP10	۲۶.۶	۲۴.۳	۲۵.۳
RCP15	۲۴.۷	۲۲.۵	۲۳.۶
RCP20	۲۲.۳	۲۰	۲۱.۱

طبق جدول۵ نتایج با یکدیگر مقایسه و درصد بهبود در ترکهای بتن با روش خودترمیمی با کربناته شدن در شکل ۹ داده شده است.



شکل ۹- درصد خودترمیمی نمونه بتنهای غلطکی

با دقت در در جدول ۵ و شکل۹ ملاحظه می نماییم که علی رغم آنکه مقاومت ذاتی در جدول ۵ با افزایش پودر صدف کاهش یافته است ولی در شکل۹ مشاهده می نماییم که بیشترین درصد خودترمیمی در RCP20 می باشد که با افزایش پودر صدف میزان خودترمیمی در نمونه ها نیز سیر صعودی داشته اند.



شکل ۱۰- نمونه بنی قبل و بعد از کربناته شدن و ترمیم ترک ۲۰ میکرومتر

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از چهار آزمایش انجام شده در این پژوهش مشاهده می کنیم که همبستگی معنی داری بین تمام نتایج برقرار است و نمونه ی دارای ۱۰ درصد پودر صدف در همه آزمایشها از لحاظ مقاومت و دوام بهترین و نمونه دارای ۲۰ درصد ضعیف ترین نمونه ما بوده است. نقطه عطف نیز در تمام آزمایشها نمونه RCP10 بوده است.

با در نظر گرفتن اینکه طبق موضوع مقاله ما به دنبال جذب بالای دی اکسید کربن و در نتیجه بررسی خودترمیمی بتن تحت تاثیر کربناته شدن بودیم نمو نه ها با افزایش پودر صدف کربناته شدن بالایی نیز از خود نشان داده اند که طبق شکلها و نمودارها نیز مشاهده می نماییم که روند خودترمیمی نیز با افزایش کربناته شدن روند صعودی به خود گرفته است ولس به هرحال نمونه ها به علت جذب آب بالای پودر صدف بعد از ۱۰ درصد افت فاحشی در مقاومت فشاری که مهمترین مشخصه بتن است از خود نشان داده اند لذا با مد نظر قرار دادن تمام نتایج میتوانیم ابراز نماییم که بهترین درصد در استفاده از پودر صدف معدنی برای بهینه ترین نتیجه مقدار ۱۰ درصدی آن می باشد. ازمسایلی که در این پژوهش به آن پرداخت نشده مسئله خوردگی فلزان در تاثیر کربناته شدن است که پیشنهاد می گردد نمون هایی که حاوی الیاف فلزی نیز هستند با ماده افزودنی پودر صذف به صورت آمیجته استفاده شوند چرا که الیاف فلزی یکی از موادی است که در بالا بردن مقاومت خمشی راههای بتنی کاربرد فراوانی دارد.

۷- منابع

۱. بهارآور، سیدرحیم و بهلکه غراوی، ارازمحمد،۱۴۰۰،تاثیر پودر صدف و الیاف پلی پروپیلن بر روی کارآیی بتن خودمتراکم عیار۴۰۰،ششمین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی و سومین کنگره بین المللی عمران، معماری و شهرسازی آسیا.

2. Şimşek,O., Baharavar, S. (2013). Çelik lifli ve uçucu kullu betonlarda karbonatlaşmanın etkisi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji DergisiDOI: 10.15317/Scitech.201415957 Konya, Türkiye, 21-34.

3. Powers, T. C.(1949). The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland Cement Paste –Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination, Research Department Bulletin RX029, Portland Cement Association.

4. Fardin, H.E.; Santos, A.G.d. Roller Compacted Concrete with Recycled Concrete Aggregate for Paving Bases. *Sustainability* 2020, *12*, 3154

5. ASTM C1040-05Standard Test Methods for In-Place Density of Unhardened and Hardened Concrete, Including Roller Compacted Concrete, By Nuclear Methods, 1 July 2005,. ICS Code: 91.100.30

6. Astm C 109M .،Standard Test Method forCompressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using2-in. or [50 mm] Cube Specimens)1

7. BS EN 13295:2004,. Products and systems for the protection and repair of concrete structures.Test methods. Determination of resistance to carbonation. Released: 2004-07-12, ICS categories:91.080.40 Concrete structures

8. ASTM C39/C39M (2016) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken.

9. ASTM C 666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, MR93-1,. MISSOURI HIGHWAY AND TRANSPORTATION DEPARTMENT