ارزیابی عملکرد دوام بتن با اشباع‌کننده‌ی سدیم سیلیکات

این مقاله، یک عملکرد بهبودیافته در بتن اشباع شده با ترکیب سیلیکات را ارائه می‌نماید. دو نوع مختلف از مواد اشباع‌کننده[1] (نوع غیرآلی[2] و ترکیبی) در نمونه‌های بتنی با رده‌ی مقاومتی مختلف (۲۱ و ۳۴ مگاپاسکال) به کار گرفته شده است. با توجه به آزمایش در مقیاس آزمایشگاه، عملکردهای بهبودیافته در بتن اشباع شده با توجه به تخلخل، مقاومت، ضریب انتشار کلر، نفوذپذیری هوا یا آب و جذب، ارزیابی شده‌اند. آزمایش‌های طولانی مدت که در آن نمونه در معرض محیط قرار می‌گیرد، شامل آزمایش‌های مقاومت، مقدار و عمق نفوذ کلر[3] و پتانسیل الکتریکی برای خوردگی[4] فولاد در شرایط دریایی مختلف انجام شده‌اند. با توجه به این که بتن با سطح اشباع شده، افزایش مقاومت اندکی دارد؛ افزایش قابل‌توجه تخلخل، جذب و نفوذپذیری ارزیابی شده است. مقاومت در برابر هجوم کلر به طور منطقی در طی اسپری کردن ساده‌ی سیلیکات غیرآلی در شرایط جوی نمکی افزایش یافته است.

۱. مقدمه

سازه‌های بتن آرمه معمولا در معرض فرسودگی قرار دارند و آسیب‌های ناشی از فرسودگی[5] در نهایت منجر به مشکلات ایمنی سازه‌ای علی‌رغم عملکرد مناسب سازه‌ای و دوام می‌گردد. اخیرا تکنیک‌های تعمیر با استفاده از اشباع سطح به منظور بهبود مشخصات بتن پیشنهاد شده است [۱-۴]. اهمیت تحقیقاتی بتن با سطح اشباع از دو دیدگاه قابل توصیف است. یکی از آن‌ها، توسعه‌ی مصالح تعمیر فعال با استفاده از ترکیب سیلیکات است. در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰، اشباع کردن با استفاده از ترکیب سولفات به منظور افزایش مقاومت و الاستیسیته‌ی بتن استفاده شد. اگرچه تکنولوژی تعمیر با استفاده از ترکیب افزودنی از اترینگایت[6] به عنوان ترکیب سولفات، به دلیل فرآیند هیدراتاسیون دیگر یا دمای بالای موردنیاز برای اشباع‌سازی، یک کاربرد محدود برای سازه‌های بتنی داشت [۴]. پس از آن، مواد آلی مایع یا اشباع‌کننده‌های سطح غیرآلی یا آلی با استفاده ترکیب سیلیکات برای سازه‌های بتن آرمه به عنوان تکنیک‌های تعمیر، توسعه داده و به کار گرفته شد [۵-۸]. ترکیب سیلیکات اشباع شده مانند سیلیکات کلوئیدی و سدیم سیلیکات مکش مویینگی با کلسیم هیدروکسید در بتن واکنش داده و ژل CSH اضافی را تولید می‌کند [۹]. در حین واکنش با SiO_2 و $Ca(OH)_2$، ساختار حفره در بتن برای چگال‌تر شدن و بسته شدن ترک‌های ریز غیر قابل‌مشاهده، اصلاح شده است. دیدگاه دیگر، توسعه‌ی سیستم تعمیر با استفاده از ترکیب سیلیکات و تجهیزات مرتبط است. اشباع‌کننده‌ی

[1] Impregnant
[2] Inorganic
[3] Chloride penetration
[4] Corrosion
[5] Deterioration
[6] Ettringite

آلی سطح با توجه به چندین مزیت از قبیل قیمت کم و فرایند پوشش آسان معمولا به منظور آب‌بندی[7] و محافظت از سطح استفاده می‌شوند. اگرچه، بیش‌تر آن‌ها معمولا از ترکیب آلی فرار[8] تشکیل شده‌اند و نقطه‌ی ضعف تاثیرگذار آن‌ها، ایجاد آلودگی هوا در طول فرایند تولید همانند کارهای پوشش است [۸]. علاوه بر این مشکل محیط زیستی، از آن‌جایی که پوشش آلی نمی‌تواند تبخیر از قسمت داخلی بتن به بیرون را توزیع کند، تورق[9] لایه‌ی اشباع‌کننده به سادگی رخ می‌دهد. علاوه بر این، رفتارهای مصالح مانند جمع‌شدگی و انبساط دمایی در پوشش آلی به طور قابل‌توجهی از این خصوصیات در بتن متفاوت است [۲]. این مشخصات غیرهماهنگ لایه‌ی سطحی منجر به ترک، تورق و جدا شذن از سطح بتن می گردد [۲، ۸ و۱۰]. حفره‌ها و ترک‌های موجود در بتن یک مسیر برای ورود عوامل مخرب هستند که بهبود دوام می‌تواند با کاهش تخلخل و نفوذپذیری نائل شود [۱۱-۱۴]. آزمایش‌های طولانی مدت در معرض شرایط قرار دادن، برای بتن با سطح اشباع شده به صورت محدود انجام شده است؛ در حالی که آزمایش‌های خرابی سرعت‌یافته در مقیاس آزمایشگاهی به طور گسترده مورد انجام قرار گرفته است.

در این مقاله، یک عملکرد بهبودیافته برای بتن با اشباع‌سازی از نوع آلی و ترکیبی ارائه شده است. برای این منظور، دو نوع اشباع‌کننده‌ی سطح که از نوع غیرآلی و ترکیبی هستند، در دو سطح مختلف بتن به کار گرفته شده است. آزمایش‌های ارزیابی خصوصیات شامل تخلخل، ضریب انتشار کلر، مقاومت فشاری، نفوذ آب و هوا و جذب رطوبت انجام می‌شود. در طی آزمایش طولانی مدت قرار دادن در معرض شرایط، رفتارهای کلر و پتانسیل الکتریکی برای خزش بتن برای بتن با سطح اشباع شده ارزیابی شده است. بهبود کمی مشخصات مصالح و مقاومت در برابر هجوم کلر در بتن با اشباع‌شدگی سطح، در این مطالعه مورد ارزیابی و بحث قرار گرفته است.

۲. روند بهبود مشخصات هندسی از طریق اشباع سطح

۱،۲. ساختار چگال‌تر خلل و فرج با دخالت ترکیب سیلیکات. در میان ترکیبات سیلیکاتی مانند کلسیم سیلیکات، پتاسیم سیلیکات و سیلیکای کلوئیدی که از طریق واکنش هیدریتاسیون دوباره منجر به چگال‌تر شدن ساختار خلل و فرج می‌شوند، سدیم سیلیکات (Na_2O-SiO_2) اخیرا برای تکنیک تعمیر استفاده شده است. ترکیب سیلیکات از طریق مکش مویین به داخل بتن وارد می‌شود و با کلسیم هیدروکسید واکنش داده و در نهایت ژل غیرمحلول CSH (Ca-SiO_2) را شکل می‌دهد که بتن را چگال‌تر می‌کند [۶-۸، ۱۵]. بدین صورت که تخلخل در بتن طی واکنش با ترکیب سیلیکات و کلسیم هیدروکسید موجو کاهش می‌یابد که معمولا ۲۵ تا ۳۰ درصد مقدار CSH در بتن جا می‌گیرد [۱۶]. در سیستم رایج تعمیر با تکنیک چسباندن ورق[10]، معمولا چسب آلی مانند رزین اپوکسی استفاده می‌شود اما این روش به دلیل تورق لایه‌ی محافظ

[7] Waterproofing
[8] Volatile
[9] Delamination
[10] Plate-bonding

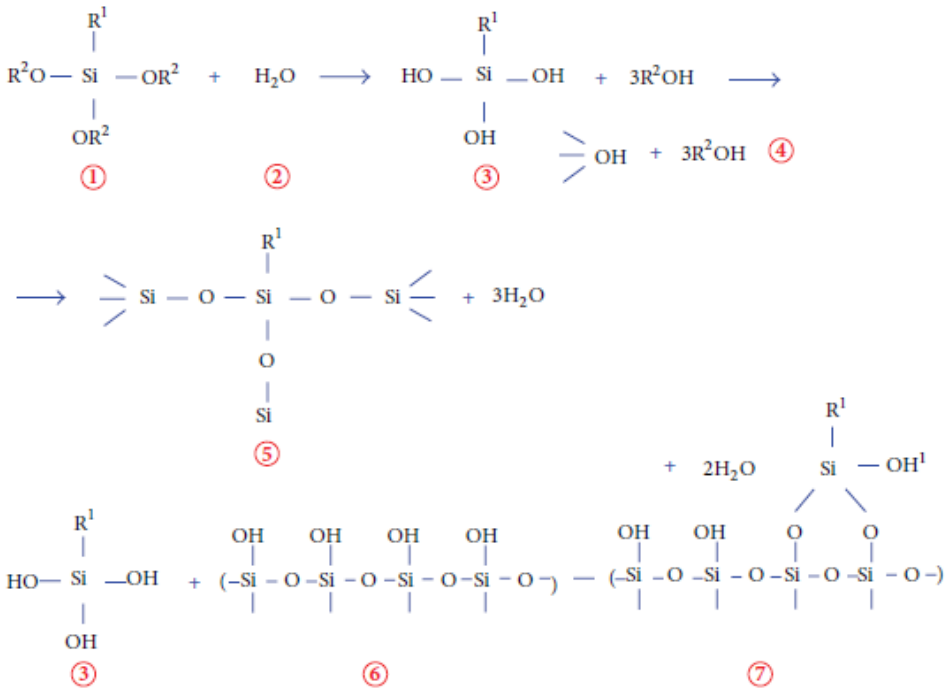
نمی‌تواند عملکرد دوام را تحت شرایط سخت تضمین نماید [۲، ۱۷، ۱۸]. مشخصه‌ی ماده‌ی ژل CSH بازتولیدی در لایه‌ی اشباع، مشابه مشخصه‌ی ماده‌ی بتن است که امکان چسبیدن مناسب بدون تورق لایه‌ی اشباع را امکان‌پذیر می‌سازد. تورق و جدا شدن لایه‌ی پوششی اغلب در پوشاندن آلی سطح بتن رخ می‌دهد [۸].

واکنش‌های غیرآلی و نوع ترکیبی اشباع به کار گرفته شده در این مطالعه، به ترتیب در واکنش‌های (۱) و (۲) نوشته شده است [۶ ، ۷] :

$$Na_2SiO_3 + yH_2O + xCa(OH)_2 \longrightarrow xCa \cdot SiO_2 \cdot yH_2O + 2NaOH \quad (۱)$$

$$R_2O \cdot SiO_2 + xCaCl_2 + yH_2O \longrightarrow xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O + ROH \quad (۲)$$

در شکل (۱)، ترکیب شیمیایی در اشباع کننده‌ی غیرآلی نشان داده شده است.



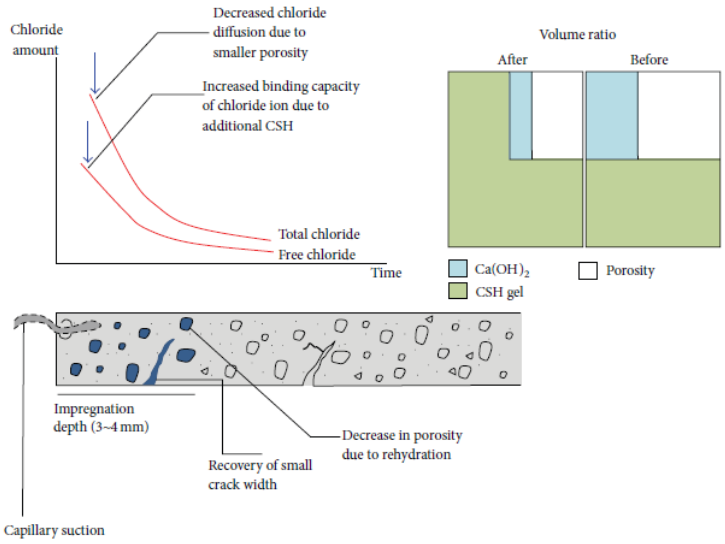
شکل ۱ : زنجیره شیمیایی در اشباع‌کننده‌ی غیرآلی

۲,۲. انتشار کاهش‌یافته کلر در اثر اشباع سطح. در بتن سخت شده، یون کلر می‌تواند به یون آزاد، که مستقیما بر خوردگی فولاد اثر می‌گذارد و نیز یون مقید کلر، که از لحاظ شیمیایی پایدار است و در شرایط محیطی سخت مانند کربناته شدن قرار نمی‌گیرد، تقسیم می‌شود [۱۹، ۲۰]. تشکیل کلر مقید مطابق با واکنش (۳) شرح داده شده است که واکنش $CaCl_2$ محلول با مونوسولفات می‌باشد. همانند واکنش (۳)، $CaCl_2$ محلول مطابق آنچه در واکنش (۴) نشان داده شده است می‌تواند از طریق دخالت ترکیب سیلیکات، تبدیل به ترکیب نامحلول سیلیکات شود:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O + CaCl_2 \longrightarrow C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O + CaSO_4 \quad (۳)$$

$$R_2O \cdot SiO_2 + xCaCl_2 + yH_2O \longrightarrow xCaO \cdot SiO_2 \cdot yH_2O + ROH \quad (۴)$$

بر اساس تحقیقات قبلی [۲۱]، یون کلر در آب منفذی[11] می‌تواند از طریق جذب ژل CSH تبدیل به یون مقید کلر شود که این اتفاق بستگی به مقدار ژل CSH دارد. مقاومت در برابر هجوم کلر می‌تواند از هر دو طریق افزایش یون مقید کلر با بازتولید CSH و نیز کاهش انتشار یون کلر با توجه به ساختار کاهش‌یافته‌ی تخلخل در لایه‌ی سطح اشباع به دست آید. اگر مشخصه‌ی سطح بتن بهبود یابد، می‌تواند مقاومت موثر را برای مقابله با هجوم کلر ایجاد کند. این ویژگی‌های دوام با استفاده از مشخصات پوسته‌ی بهبودیافته توسط هر دو روش آزمایشگاهی [۵] و تحلیلی [۲۲] تایید شده است. مقاومت بهبودیافته در مقابل هجوم کلر با استفاده از بتن با سطح اشباع شده در شکل (۲) خلاصه شده است.



شکل ۲ بهبود دوام در بتن با سطح اشباع شده

[11] Pore water

۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱,۳. مواد استفاده شده. در این مطالعه دو اشباع‌کننده‌ی سطح برای نمونه‌های بتنی با دو نسبت اختلاط مختلف به کار گرفته شده‌اند. یکی از آن‌ها اشباع‌کننده غیرآلی نوع (I) و دیگری، اشباع‌کننده ترکیبی غیرآلی و آلی نوع (C) است. مشخصات اشباع‌کننده‌های مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. نسبت‌های اختلاط بتن و مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها به ترتیب در جداول (۲) و (۳) مشخص شده‌اند.

۲,۳. فرایندهای آزمایش. برنامه‌ی آزمایش در این مقاله، دو بخش دارد؛ یکی برای ارزیابی مشخصات بهبودیافته بعد از اشباع‌سازی و دیگری برای ارزیابی دوام تحت هجوم کلر به مدت ۲ سال در آزمایش قرار دادن در شرایط است.

۱,۲,۳. بهبود مشخصات مهندسی از طریق اشباع کردن سطح

(۱) عمل‌آوری و اشباع‌سازی. آزمایش‌های مربوطه برای بالا بردن مشخصات مهندسی شامل اندازه‌گیری تخلخل، ضریب انتشار کلر، مقاومت فشاری، نفوذ آب یا هوا و نسبت جذب آب هستند. نمونه‌های بتنی بر اساس جدول (۲) ترکیب و سه نمونه برای هر آزمایش تولید می‌شوند. قاب هر نمونه پس از یک روز باز می‌شود و به مدت ۴ هفته در شرایط مستغرق (دمای ۲۰ درجه‌سانتی‌گراد) عمل‌آوری می‌شوند. پس از عمل‌آوری به مدت ۴ هفته، به مدت ۲هفته در معرض هوا قرار می‌گیرند و سپس اشباع‌سازی سطح از طریق اسپری کردن انجام می‌شود. مراحل آزمایش، اندازه‌ی نمونه‌ها و فرایند عمل‌آوری در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول ۱ مشخصات اشباع‌کننده‌های سطح مورد استفاده

	Type	Main ingredient	Color	Viscosity (cp)	Surface tension (dyne/cm)	Solvent
I	Inorganic	Sodium silicate	No color	3.72	26.0	Alcohol
C	Combined inorganic/organic	Sodium silicate + polymer	Sky blue	4.13	38.0	Water

جدول ۲ نسبت‌های اختلاط بتن

MPa	Slump (cm)	w/c (%)	S/a	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)
21	15	55.4	45.8	166	267	810	979
34	15	48.7	43.0	185	380	731	994

S/a: ratio of sand to total aggregate; W: water; C: cement; S: Sand; G: gravel.

جدول ۳ خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها

Type	G_{max} (mm)	Density (g/cm^3)	Absorption (%)	Fineness modulus
Fine aggregate	—	2.60	0.95	2.64
Coarse aggregate	25	2.65	0.85	6.80

جدول ۴ نمونه‌ها و فرایندهای عمل‌آوری

Test	Specimens (mm)	Curing and impregnation
Porosity	50 × 50 × 50 (cubic)	(1) Mixing based on Table 2 (2) Curing in air for 1 day (3) Curing in water for 4 weeks (4) Drying in air for 2 weeks (5) Spraying impregnant (6) Curing in air for 2 weeks
Chloride diffusion coefficient	100 × 50 (cylinder)	
Compressive strength	100 × 200 (cylinder)	
Permeability of water and air	200 × 200 × 100 (rectangular)	
Absorption	100 × 100 × 100 (cubic)	

(۲) آزمایش‌های بتن اشباع شده. برای بتن کنترل (۲۱ مگاپاسکال و ۳۴ مگاپاسکال) و بتن اشباع شده (نوع I و C)، تخلخل با استفاده از تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه[12] اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به بازتولید CSH اضافی، تخلخل در بتن اشباع شده کاهش می‌یابد که منجر به بهبود عملکرد دوام می‌شود. این مقادیر بر اساس راهنماهای مربوطه اندازه‌گیری اندازه‌گیری می‌شوند [۲۳]. برای طراحی دوام، ضریب انتشار کلر پارامتر اساسی است. در این آزمایش، آزمایش تسریع‌شده در شرایط غیرساکن[13] بر اساس مطالعه‌ی قبلی انجام شده است [۲۴]. ضریب انتشار کلر می‌تواند مطابق زیر به دست آید:

$$D_{\mathrm{cpd}} = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t},$$
$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \mathrm{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right], \quad (۵)$$

که در آن D_{cpd} ضریب انتشار در شرایط حالت ناپایدار از آزمایش نفوذ سریع کلر (بر حسب متر بر مجذور ثانیه)، R ثابت جهانی گاز (۸/۳۱۴ J/mol.K)، T دمای مطلق (بر حسب کلوین)، L ضخامت نمونه (بر حسب متر)، z والانس یونی (برابر با ۱)، F ثابت فارادی (۹۶۵۰۰ J/V mol)، U پتانسیل اعمال‌شده (بر حسب ولت)، x_d عمق نفوذ کلر (بر حسب متر)، t مدت زمان آزمایش (بر حسب ثانیه)، C_0 غلظت کلر در محلول جریان بالادستی (بر حسب مول بر لیتر)، C_d غلظت کلر در جریان نفوذ (بر حسب مول بر لیتر) و erf^{-1} معکوس تابع خطاست.

مقاومت فشاری به عنوان پارامتر اساسی برای ارزیابی ویژگی در نظر گرفته می‌شود؛ از این رو، آزمایش مقاومت فشاری نیز بر اساس KS F 2405 انجام می‌شود [۲۵]. نفوذپذیری آب و هوا نیز نقش‌های مهمی در عملکرد دوام دارند؛ زیرا آن‌ها مستقیما با انتقال رطوبت مربوط می‌شوند. از آن‌جا که بتن در شرایط نیمه اشباع همواره اختلاف رطوبت دارد، تبخیر در سطح رخ می‌دهد. هنگامی‌که ماده‌ی غیرآلی بدون تبخیر رطوبت در سطح خارجی، پوشانده می‌شود، منجر به تورق و جداشدگی ماده‌ی پوشاننده می‌گردد [۸]. نفوذ آب و هوا می‌تواند به ترتیب از طریق روابط (۶) و (۷) محاسبه شود [۶ و ۷]:

$$C_{CP} = \frac{q}{P/L} \quad (۶)$$

[12] Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)
[13] Nonstationary

$$K = 4\left[\frac{V_c(dP_I/dt)^2}{A\left(P_a^2 - P_I^2\right)}\right]\frac{\mu P_a}{\varepsilon}\int_{t_0}^{t}\left[1-\left(\frac{P_I}{P_a}\right)^2\right]dt, \qquad (۷)$$

که در آن‌ها، C_{CP} نفوذپذیری آب (بر حسب مترمربع بر ثانیه)، q سرعت (بر حسب متر بر ثانیه)، K نفوذپذیری هوا (بر حسب متر مربع)، ε تخلخل بتن (بر حسب یک بر مترمکعب)، A مساحت محفظه، μ لزجت دینامیکی هوا (Ns/m^2)، و V_c حجم محفظه (بر حسب متر مکعب) هستند.

به منظور به دست آوردن نسبت‌های جذب برای نمونه‌های مختلف بتن، نمونه‌های اشباع شده به مدت ۷۲ ساعت پس از عمل‌آوری بر اساس KS D 2459 مطابق آنچه در جدول (۴) نشان داده شده است، در شرایط مستغرق نگه داشته می‌شوند [۲۶]. نسبت جذب مطابق زیر به دست می‌آید:

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100, \qquad (۸)$$

که در آن A نسبت جذب (بر حسب درصد) و W_1 و W_2 (بر حسب گرم)، وزن نمونه‌ها به ترتیب قبل و بعد از شرایط استغراق هستند.

۲,۲,۳ بهبود دوام با استفاده از اشباع سطح

(۱) مقاومت فشاری. روش آزمایش و طرح اختلاط برای بتن مشابه با آزمایش مقاومت فشاری است که در بخش ۱,۲,۳ توضیح داده شد. نمونه‌های بتن به مدت ۲ هفته در شرایط مستغرق، عمل‌آوری می‌شوند و اشباع‌سازی پس از ۲ هفته در معرض هوا انجام می‌شود. پس از اشباع‌سازی، نمونه‌ها در ناحیه‌ی جزر و مدی[۱۴] از آب دریا قرار می‌گیرند. مقاومت فشاری در زمان‌های ۲۸ روزه، ۹۰ روزه، ۳۶۰ روزه و ۷۲۰ روزه ارزیابی می‌گردند. ۳ نمونه‌ی بتنی برای مقادیر میانگین در هر زمان اندازه‌گیری تهیه می‌شوند.

(۲) عمق نفوذ کلر. نمونه‌های استوانه‌ای (۱۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر) با فرایندهای عمل‌آوری و اشباع‌سازی مشابه تهیه و در شرایط کلری قرار داده می‌شوند. نمونه‌ها با مقاومت فشاری ۲۱ مگاپاسکال در شرایط جوی (نمک‌پاشی شده)، جزر و مدی و مستغرق در آب دریا قرار داده می‌شوند. نمونه‌هایی با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال تنها در شرایط جزر و مدی قرار می‌گیرند. برای اندازه‌گیری عمق نفوذ کلر، آزمایش ترکاندن[۱۵] انجام می‌شود و محلول نقره نیترات (۰/۱N) به عنوان شناساگر بر اساس تحقیق قبلی بر روی مقطع شکافته شده اسپری می‌گردد [۲۷]. برای اندازه‌گیری عمق نفوذ کلر، عمق‌های رنگ شده ۱۰ بار در فواصل ۱۰ میلی‌متری اندازه‌گیری می‌شوند و میانگین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. گزارش شده است که وقتی غلظت کلر آزاد (وزن سیمان) از طریق شناساگر نقره نیترات (۰/۱N) به ۰/۱۵ درصد می‌رسد، رنگ در لایه‌ی شکافته شده

[14] Tidal zone
[15] Splitting test

تغییر می‌کند. به منظور راحتی، روش اندازه‌گیری کلر با استفاده از نقره نیتریت (۰/۱N) در این مقاله ارائه شده است. شناساگر بهینه و فرایندها با روش‌های آزمایش و غلظت کلر متفاوت می‌باشند. شناساگرهای واکنش‌پذیر با روش‌های مختلف اندازه‌گیری کلر به خوبی در مرجع [۲۸] خلاصه می‌شوند.

(۳) پتانسیل الکتریکی برای خوردگی فولاد. برای ارزیابی خوردگی فولاد، پتانسیل‌های الکتریکی (پتانسیل نیم‌پیل[۱۶]) برای نمونه‌های بتن آرمه (ابعاد ۵۰ در ۵۰ در ۴۰۰ میلی‌متر) بر اساس ASTM C 876-80 اندازه‌گیری می‌شوند [۲۹]. شرایط عمل‌آوری و قرارگیری برای این آزمایش مشابه آن‌چه برای عمق نفوذ کلر انجام شد، می باشند. میلگردهای فولادی با قطر ۱۰ میلی‌متر در نمونه‌ی بتن‌آرمه با عمق پوششی ۲۰ میلی‌متری قرار می‌گیرند. میلگردهای نمایان از سطح بتن به منظور جلوگیری از خوردگی با اپوکسی پوشانده می‌شوند. در شکل (۳)، تصاویری از آزمایش‌های طولانی مدت نشان دادن کلر نشان داده می‌شوند.

شکل ۳ تصاویر آزمایش طولانی‌مدت نشان دادن کلر

(۴) ارزیابی مقدار کلر (محلول اسید). به منظور ارزیابی مقدار کلر در هجوم کلر، نمونه‌های استوانه‌ای در شرایط جزر و مدی و مستغرق قرار می‌گیرند. برای نفوذ یک بعدی، قسمت جانبی و زیرین با اپوکسی پوشانده می‌شوند و تنها سطح بالایی مستقیما در معرض آب دریا قرار می‌گیرد. بر اساس AASHTO T 260، محلول استاندارد نقره نیترات برای شناسایی مقدار کلر استفاده می‌گردد. پس از سابیدن پوشش بتنی به عمق ۱۰ میلی‌متر، ذرات با افزودن HNO_3 مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

۴. نتایج و بحث

۱،۴. ویژگی‌های بهبودیافته‌ی بتن با سطح اشباع شده.

تخلخل در بتن با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال در مقایسه با نتایج کنترل، ۶۲/۸ تا ۷۴/۴ درصد کاهش می‌یابد. نتایج در مورد بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال، کاهشی بین ۴۵/۴ تا ۹۱/۷ درصدی را نشان می دهند و وقتی مقدار کلسیم هیدروکسید برای واکنش با ترکیب سیلیکات بیش‌تر باشد، به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابند. حفرات بتن با مکانیزم انتشار بسیار مرتبط هستند؛ از این رو می‌توان با اشباع‌سازی به کاهش انتشار کلر دست

[16] Half Cell Potential

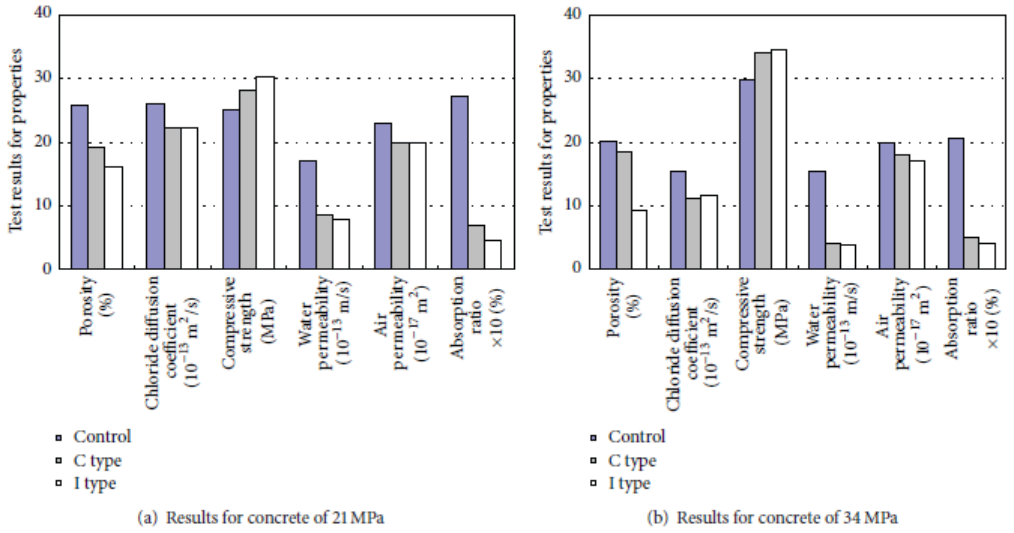
یافت. ضریب انتشار کلر تا به مقادیر ۸۵ درصد (در بتن با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال) و بین ۷۱/۶ تا ۷۴/۸ درصد (برای بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال) کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن عمق پوشش ۱۰۰ میلی‌متر و مقدار بحرانی کلر برابر با ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب، مطابق ارزیابی انجام شده، عمر بهره‌برداری از طریق اسپری کردن ساده‌ی اشباع‌کننده‌ی نوع I در بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال بر اساس قانون دوم فیک[17]، از ۳۷/۸ سال به ۵۰/۵ سال افزایش می‌یابد [۳۰]. بر اساس نتایج مربوط به اندازه‌گیری مقاومت فشاری، برای هر دو نمونه‌ی بتن اشباع شده، این مقادیر اندکی افزایش یافت؛ دلیل این امر را می‌توان در بهبود مشخصات مصالح صرفا در عمق اشباع‌شدگی (کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر) دانست. افزایش قابل‌توجهی در مقاومت در این آزمایش اندازه‌گیری نشد. نسبت‌های به دست آمده‌ی مقاومت بین ۱۱۲/۴ تا ۱۲۱/۲ درصد (برای بتن با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال) و بین ۱۱۴/۱ تا ۱۱۶/۱ درصد (برای بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال) ارزیابی می‌شود. نفوذپذیری آب/ هوا، یک ویژگی منحصر به فرد برای محیط‌های متخلخل مانند بتن است. این ویژگی به شدت با انتقال عوامل خارجی مرتبط است؛ از این رو می‌تواند به عنوان شاخص دوام استفاده شود [۳۱]. در آزمایش نفوذ آب، نسبت‌های کاهشی با توجه به نمونه‌های کنترل بین ۴۵/۴ تا ۵۰ درصد در بتن با سطح اشباع‌شده با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال و ۲۵/۶ تا ۲۷/۳ درصد در مقاومت ۳۴ مگاپاسکال اندازه گیری می‌شوند. در آزمایش نفوذپذیری هوا، نسبت‌های کاهشی در بتن با سطح اشباع با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال، ۸۶/۷ درصد و برای مقاومت ۳۴ مگاپاسکال، بین ۸۵ تا ۹۰ درصد اندازه‌گیری شده است. مشابه نتایج مقاومت فشاری، اختلاف قابل‌توجهی بین انواع اشباع‌کننده‌ها وجود ندارد. از آن‌جایی که بتن با سطح اشباع شده، کاهش چشم‌گیری در کاهش نفوذپذیری آب نشان می‌دهد؛ به نظر می‌رسد اثر آن بر نفوذپذیری هوا اندک است. همانطور که قبلا توضیح داده شد، تورق بین بتن و پوشش سطحی در بتن اشباع شده با مواد آلی به راحتی رخ می‌دهد؛ زیرا پوشش سطح نمی‌توانند اجازه‌ی تبخیر را به سطح خارجی بدهند [۲، ۶-۸، ۱۰]. مشخصه‌ی بهبودیافته با کاهش نفوذپذیری آب و در عین حال حفظ نفوذپذیری هوا، یک مزیت مهندسی قابل اشاره است و می‌تواند از تورق لایه‌ی اشباع جلوگیری کند. بتن با سطح اشباع دارای مشخصات آب‌گریز[18] است؛ با توجه به این موضوع، می‌تواند نفوذ آب را کاهش دهد. نسبت‌های کاهش در آزمایش جذب در بتن با سطح اشباع با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال ۱۶/۹ تا ۲۵/۷ درصد و با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال، ۱۸/۵ تا ۲۵/۹ درصد اندازه‌گیری شده است. با توجه به کل نتایج آزمایش، بتن با پوشش غیرآلی (نوع I) به مقدار اندکی عملکرد بهتری در هر دو نمونه‌ی بتن با مقاومت‌های ۲۱ و ۳۴ مگاپاسکال از خود نشان می‌دهد. نتایج مشخصات بهبودیافته در جدول (۵) و شکل (۴) خلاصه می‌شوند. شکل‌های (4a) و (4b)، به ترتیب نتایج بتن اشباع‌شده با مقاومت ۲۱ و ۳۴ مگاپاسکال را نشان می‌دهند.

اثر اشباع کردن سطح بر مشخصات مهندسی در کاهش تخلخل، نفوذپذیری آب و نسبت جذب در مقایسه با دیگر حالت‌ها چشم‌گیر می‌باشد.

[17] Fick’s 2nd Law
[18] Hydrophobic

جدول ۵ خلاصه‌ی آزمایش‌های مشخصات اصلاح شده

Test items	Concrete-21 MPa (% to control of 21 MPa)			Concrete-34 Mpa (% to control of 34 MPa)		
	Control	C type	I type	Control	C type	I type
Porosity (%)	25.8 (100.0)	19.2 (74.4)	16.2 (62.8)	20.2 (100.0)	18.5 (91.7)	9.2 (45.4)
Chloride diffusion coefficient (m^2/sec)	2.61 (100.0)	2.23 (85.4)	2.23 (85.4)	1.55 (100.0)	1.11 (71.6)	1.16 (74.8)
Compressive strength (MPa)	25.0 (100.0)	28.1 (112.4)	30.3 (121.2)	29.8 (100.0)	34.0 (114.1)	34.6 (116.1)
Water permeability (10^{-14} m/sec)	170.7 (100.0)	85.4 (50.0)	77.6 (45.4)	153.8 (100.0)	42.0 (27.3)	39.4 (25.6)
Air permeability (10^{-16} m^2)	2.3 (100.0)	2.0 (86.9)	2.0 (86.9)	2.0 (100.0)	1.8 (90.0)	1.7 (85.0)
Absorption (%)	2.7 (100.0)	0.7 (25.7)	0.5 (16.9)	2.1 (100.0)	0.5 (25.9)	0.4 (18.5)

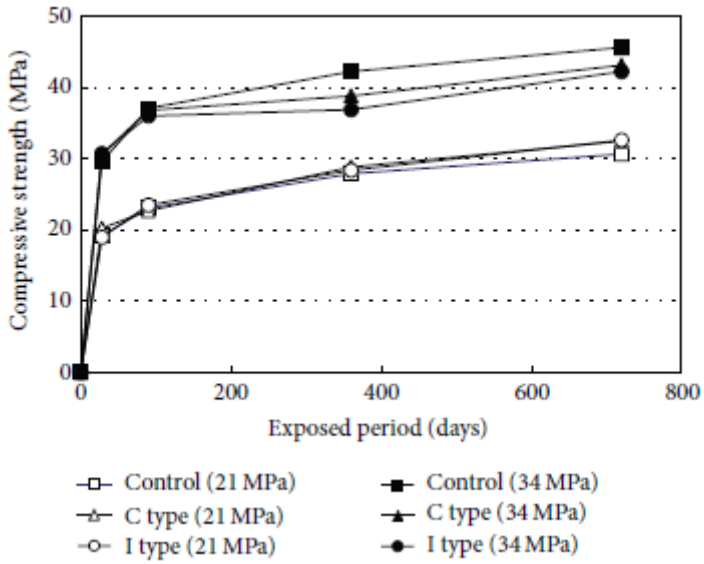


شکل ۴ نتایج آزمایش مشخصات اصلاح شده

۲،۴. ارزیابی دوام برای بتن با سطح اشباع شده

۴،۲،۱. مقاومت فشاری در معرض طولانی مدت هجوم کلر

همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، مقاومت فشاری در بتن اشباع شده در بازه‌ی قرار گرفتن در شرایط افزایش می‌یابد اما مقاومت مشخص و واضحی به دست نمی‌آید. عمق اشباع شده در هنگام اشتفاده از اسپری کردن، معمولا ۵ تا ۶ میلی‌متر است. در نتایج موجود در جدول (۵)، نسبت‌های افزایش مقاومت بین ۱۱۲/۴ تا ۱۲۱/۲ درصد هستند؛ اگر چه نتایج این بخش به دلیل شرایط عمل‌آوری و بازه‌ی زمانی مختلف متفاوت با آن‌چه در جدول (۵) است، می‌باشد. پیشنهاد می‌شود صرف نظر از افزایش مقاومت، روش ترمیم محافظه‌کارانه در نظر گرفته شود. افزایش اندک مقاومت فشاری در بتن با سطح اشباع با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال اندازه‌گیری می‌شود؛ در حالی‌که در مقاومت ۳۴ مگاپاسکال، این مقدار تا رسیدن به ۹۲/۶ تا ۹۴/۵ درصد کاسته می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط محیط خشن مانند ناحیه‌ی جزر و مدی که حملات فیزیکی و شیمیایی به طور همزمان رخ می‌دهند، به نظر می‌رسد اختلاف مقاومت اندازه‌گیری شده اندک باشد.

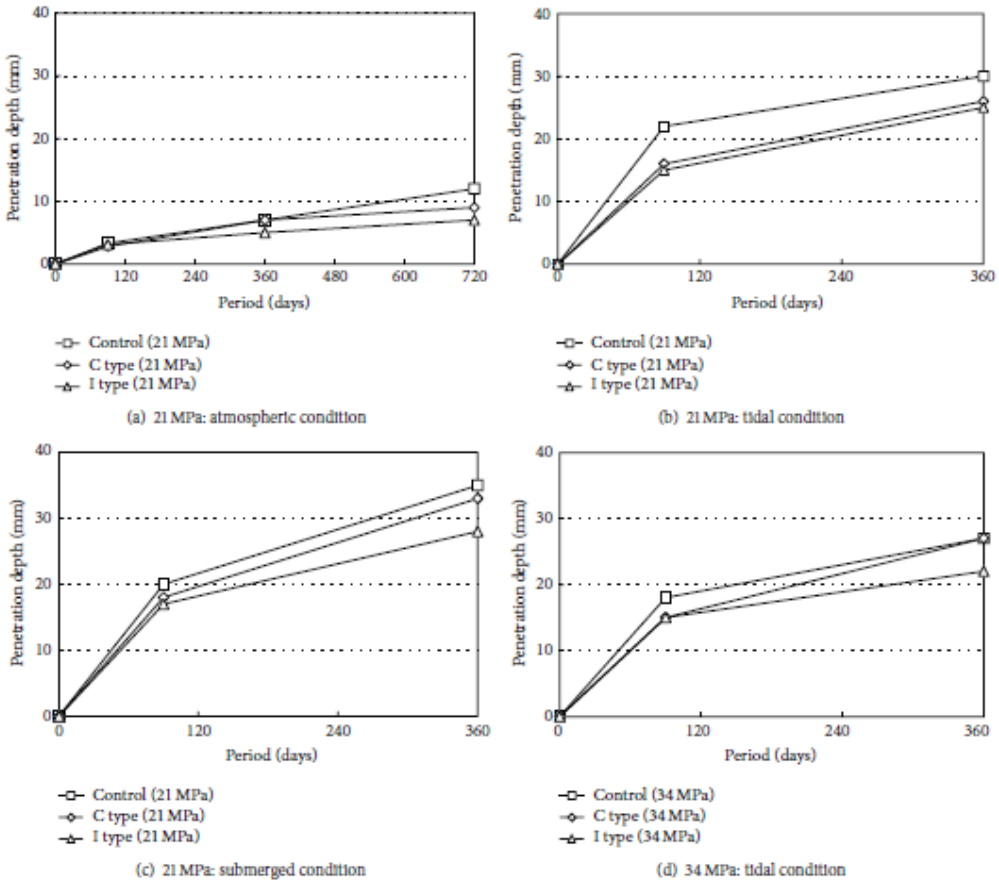


شکل ۵ تغییر در مقاومت فشاری در بتن با سطح اشباع تحت شرایط در معرض قرار گرفتن طولانی مدت

۲,۲,۴. عمق نفوذ کلر در معرض طولانی مدت هجوم کلر

اندازه‌گیری عمق نفوذ کلر با شرایط قرارگیری مختلف در شکل (۶) نشان داده می‌شود. همانطور که در بخش ۲,۲,۳ توضیح داده شد، نمونه‌های با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال در ۳ شرتیط مختلف شامل شرایط جوی، جزر و مدی و مستغرق قرار می‌گیرند. بتن‌های با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال تنها در شرایط جزر و مدی قرار می‌گیرند.

در طراحی دوام، عمق نفوذ کلر با مقدار کلر بحرانی (۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب) در طول زمان خدمت‌رسانی هدف بایستی کم‌تر از عمق پوشش باشد؛ زیرا یون کلر به دلیل انتشار سریع و تاثیر مستقیم آن بر خوردگی فولاد، یکی از بحرانی‌ترین عوامل خرابی می‌باشد [۱، ۱۲، ۲۷، ۲۹]. همانطور که در شکل (۶) نشان داده می‌شود، عمق نفوذ کلر در بتن اشباع شده با هر دو نوع I و C از طریق افزایش اشباع‌شدگی سطح، کاهش می‌یابد. نمونه‌های بتنی با اشباع‌سازی غیرآلی، مقاومت بهتری در مقابل نفوذ کلر نشان می‌دهند و این روند برای بازه‌های طولانی‌تر قرارگیری در شرایط، واضح‌تر است. مقاومت در مقابل هجوم کلر به شدت به عمق اشباع‌سازی سیلیکات مرتبط است. عمق اشباع سازی با مکش مویینه‌ی فعال شده که به دلیل لزجت و کشش سطحی پایین‌تر نوع اشباع‌کننده رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد [۵-۷]. نسبت عمق نفوذ کلر در جدول (۶) آورده شده است. بر خلاف ارزیابی مقاومت، مقاومت قابل‌قبولی در مقابل نفوذ کلر مشاهده می‌شود.



شکل ۶ عمق نفوذ کلر در بتن با سطح اشباع شده

جدول ۶ نسبت کاهش عمق نفوذ کلر

Period (days)	Condition	Control	C type	I type
		Ratio of chloride penetration depth (21 MPa: %)		
360	Tidal	100.0	94.3	80.0
360	Submerged	100.0	86.7	83.3
720	Salt-sprayed	100.0	75.0	58.3
		Ratio of chloride penetration depth (34 MPa: %)		
360	Tidal	100.0	100.0	81

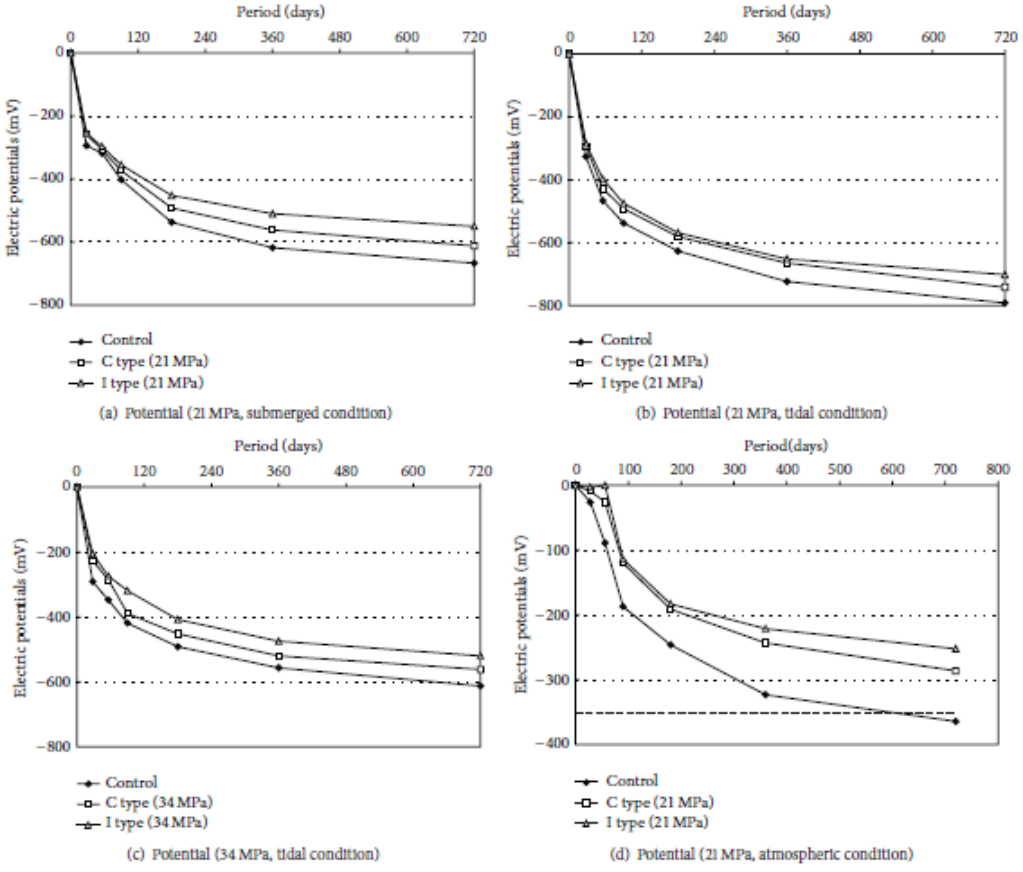
۳،۲،۴. پتانسیل الکتریکی برای خوردگی فولاد (نیم پیل مس-مس-سولفات[۱۹])

گزارش شده است که از آن‌جایی که احتمال خوردگی به وسیله‌ی پتانسیل الکتریکی و مقاومت اطراف موقعیت فولاد کنترل می‌شود، خوردگی فولاد در موقعیت‌هایی که پتانسیل الکتریکی کم‌تری اندازه‌گیری شده است،

[19] Copper-Copper Sulfate Half Cell (CSE)

به راحتی رخ می‌دهد [۲۹، ۳۲]. نتایج پتانسیل الکترونیکی مطابق با شکل (۷)، افزایش مقاومت در برابر خوردگی فولاد را نشان می‌دهد.

پتانسیل در بتن با سطح اشباع با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال در شکل (b) مشابه بتن با سطح غیر اشباع با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال در شکل (c) ارزیابی می‌شود. مشاهده می‌شود که بتن با مقاومت پایین مانند بتن با مقاومت بالا با اسپری کردن ساده‌ی اشباع‌سازی سطح می‌تواند به مقاومت قابل قبولی در مقابل هجوم کلر درست یابد. در تمام شرایط، بتن با اشباع‌کننده ی نوع I مقاومت بیش‌تری در مقابل خوردگی فولاد نسبت به اشباع‌کننده‌ی نوع C دارد. همانطور که قبلا اشاره شده بود، لزجت و کشش سطحی کم‌تر نوع I برای اشباع‌سازی موثرتر است. بر اساس تحقیقات قبلی [۳۱، ۳۲]، احتمال خوردگی فولاد در سطح بتن با HCP برابر ۳۵۰ mV- بیش از ۹۰ درصد است. وقتی که پتانسیل الکتریکی در نمونه‌ی کنترل پس از ۱/۸ سال به سطح بحرانی (۳۵۰ mV-) کاهش داده می‌شود، حالت‌های دیگر با اشباع‌سازی مطابق شکل (۷d) پتانسیل الکتریکی بیش‌تر از ۳۵۰mV- را پس از ۲ سال نشان می‌دهند. پتانسیل‌های الکتریکی اندازه‌گیری شده پس از ۲ سال در جدول (۷) آورده می‌شود. اثر اشباع‌سازی در شرایط جوی موثرترین حالت مشاهده می‌شود؛ زیرا ترکیب سیلیکات استفاده شده به وسیله‌ی نفوذ آب، تقطیر و به خارج شسته نمی‌شود.



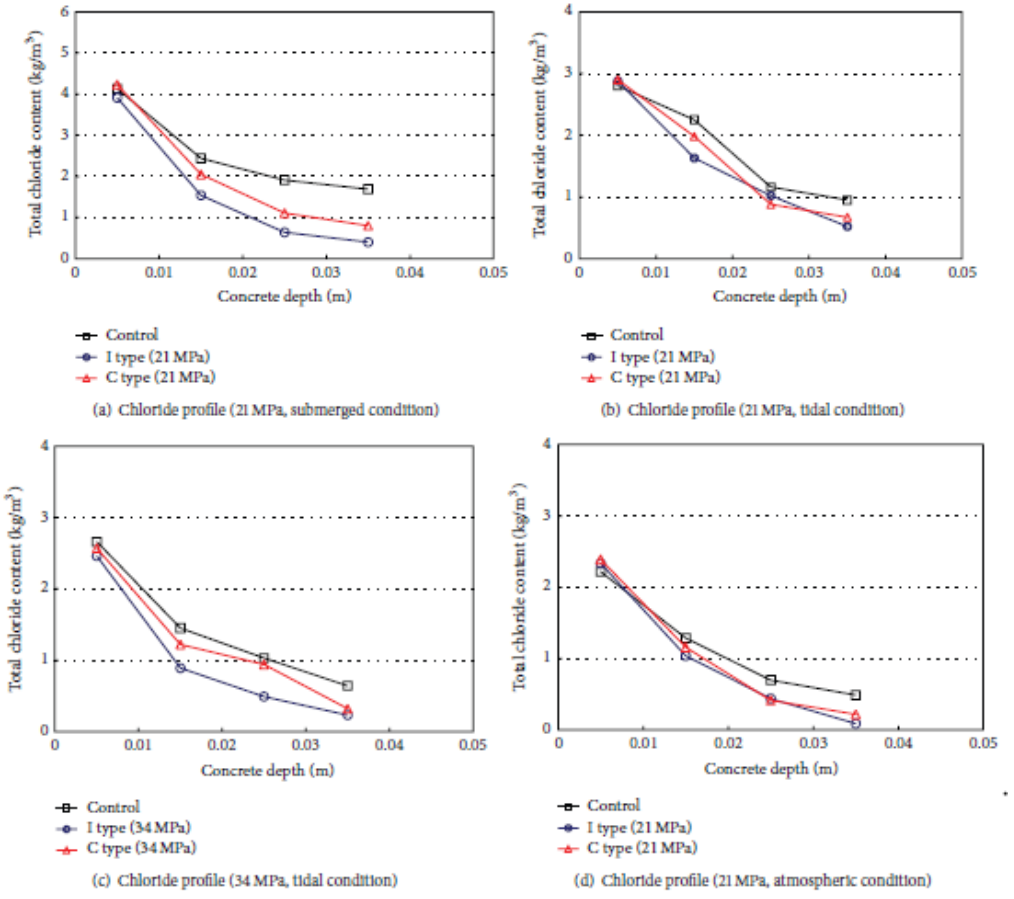
شکل ۷ نتایج پتانسیل اندازه‌گیری شده در بتن با سطح اشباع

جدول ۷ نسبت کاهش پتانسیل الکتریکی پس از ۲ سال

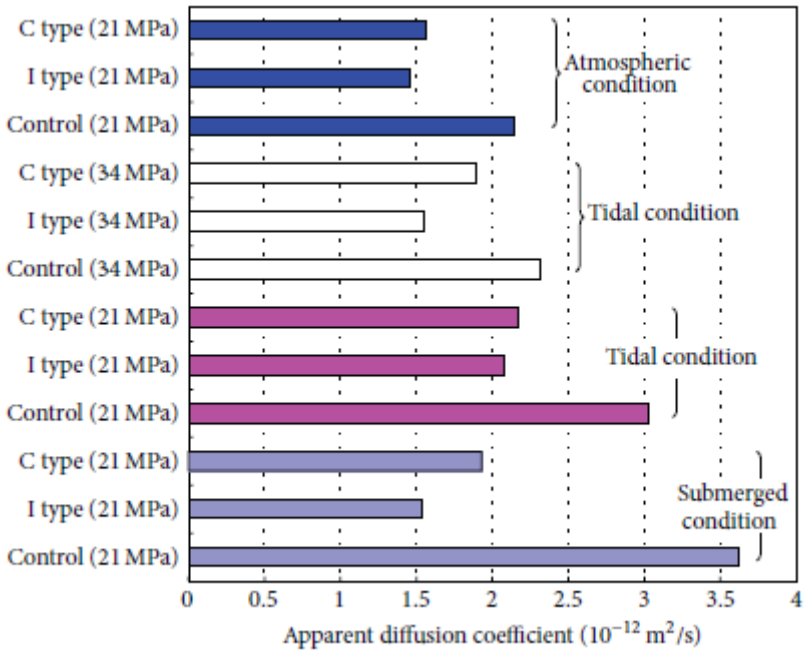
Period (days)	Condition	Control	C type	I type
			Decrease ratio of potential (21 MPa: %)	
720	Tidal	100.0	93.6	88.6
	Submerged	100.0	91.8	82.4
	Salt-sprayed	100.0	78.5	69.2
			Decrease ratio of potential (34 MPa: %)	
720	Tidal	100.0	91.6	84.8

۴،۲،۴. منحنی‌های مقادیر کلی کلر

در شکل (۸) منحنی‌های کلر برای بتن در شرایط جزر و مدی و نمک‌پاشی نشان داده می‌شوند. منحنی‌های کلر در نتایج نشان می‌دهند که مقاومت در برابر نفوذ کلر در بتن اشباع شده افزایش می‌یابد. به طور مشابه با نتایج آزمایش دوام، اشباع‌سازی با نوع I با لزجت و کشش سطحی کم‌تر، مقاومت بیش‌تری نسبت به اشباع‌سازی با نوع C نشان می‌دهد. با تحلیل رگرسیون ساده شده، ضرایب انتشار ظاهری به دست می‌آیند و در شکل (۹) مشخص می‌شوند. اثرات نسبت کاهش با توجه به ضریب انتشار ظاهری برای اشباع‌کننده‌ی نوع I برابر ۴۲/۵ تا ۶۸/۶ درصد و برای اشباع‌کننده‌ی نوع C برابر ۵۳/۹ تا ۷۲/۹ درصد می‌باشند.



شکل ۸ منحنی کلر کلی در بتن با / بدون اشباع‌سازی پس از ۲ سال



شکل ۹ ضریب انتشار ظاهری به دست آمده و مقادیر کلر سطح

۵. نکات نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی عملکرد دوام بتن با اشباع‌سازی به وسیله‌ی سدیم سیلیکات مطابق زیر می‌باشند:

۱- بتن با سطح اشباع شده، افزایش اندکی در مقاومت فشاری نشان می‌دهد. برای طراحی ترمیم محافظه‌کارانه، در نظر نگرفتن مقاومت افزوده شده در بتن با سطح اشباع معقولانه است. اثرات بهبود اشباع‌سازی سطح در کاهش نفوذ آب، جذب و تخلخل به طور چشم‌گیری مشاهده می‌شود.

۲- مقاومت در برابر نفوذ کلر بتن اشباع شده با نوع I (غیرآلی) با توجه به لزجت و کشش سطحی کم‌تر که منجر به عمق اشباع عمیق‌تر می‌گردد، کمی بهتر از بتن اشباع شده با نوع C (ترکیب غیرآلی و آلی) می‌باشد. پس از ۳۶۰ روز، اعماق نفوذ پی در بتن اشباع شده با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال نسبت به بتن کنترل به ترتیب تحت شرایط جزر و مدی به ۸۰ تا ۹۴/۳ درصد، تحت شرایط مستغرق به ۸۳/۳ تا ۸۶/۷ درصد و تحت شرایط نمک‌پاشی به ۵۸/۳ تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابند.

۳- پس از اشباع‌سازی، نتایج پتانسیل الکتریکی به ترتیب در بتن با مقاومت ۲۱ و ۳۴ مگاپاسکال نسبت به بتن کنترل به ۶۹/۲ تا ۹۱/۸ و ۸۴/۸ تا ۹۱/۶ درصد کاهش می‌یابد. بتن با سطح اشباع و مقاومت ۲۱ مگاپاسکال عملکرد دوام مشابهی با بتن با سطح اشباع نشده و مقاومت ۳۴ مگاپاسکال در پتانسیل‌های الکتریکی برای خوردگی نشان می‌دهد.

۴- از طریق تحلیل منحنی‌های کلر، ضرایب انتشاز ظاهری برای اشباع‌سازی نوع I به ۴۲/۵ تا ۶۸/۶ درصد و برای اشباع‌سازی نوع C بین ۵۳/۲ تا ۷۲/۹ درصد کاهش می‌یابند. این اثر کم‌تر از کاهش نفوذپذیری و تخلخل

می‌باشد؛ اگرچه مقاومت قابل قبول در برابر هجوم کلر به سادگی از طریث اسپری کردن ترکیب سدیم سیلیکات قابل دسترسی است.