

مروری بر منابع ضریب انتشار کلرید در بتن و پیشنهاد مدل بدیع

پرویز قدوسی *

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران.

چکیده

خوردگی آرماتور در سازه‌های بتن آرمه از مهم‌ترین عوامل آسیب در سطح دنیا محسوب می‌شود. یون‌های کلرید در اکثر موارد عامل خوردگی میلگردها هستند. بنابراین در مکان‌هایی مانند سواحل خلیج فارس و دریای عمان، ارزیابی بتن‌ها باید بر اساس دوام انجام شود که اندازه‌گیری ضریب انتشار کلرید در بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای اندازه‌گیری ضریب انتشار کلرید از انواع روش‌های مستقیم و غیرمستقیم مانند پروفیل کلرید و استفاده از قانون فیک، آزمایش تسریع شده انتشار کلرید، رسان پذیری و یا مقاومت الکتریکی استفاده می‌شود. تمام تلاش پژوهشگران در افزایش دقت ارزیابی انتشار کلرید و یا ارائه مدل‌های ساده در ۳۰ سال گذشته بوده است. در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران برای تخمین انتشار کلرید در بتن از عامل شکل‌گیری استفاده کرده‌اند. عامل شکل‌گیری، نسبت مقاومت الکتریکی بتن به محلول منافذ و یا رسان پذیری محلول منافذ به رسان پذیری بتن است. این عامل به‌عنوان یک شاخص مهم تأثیرگذار در عملکرد بتن در مقابل انتشار کلرید محسوب می‌شود. زیرا این شاخص هم دربرگیرنده مقاومت الکتریکی بتن و هم مقاومت الکتریکی محلول منافذ است. به‌عبارت‌دیگر عامل شکل‌گیری نشان‌دهنده مقدار تخلخل در بتن و نوع و مقدار یون‌ها در منافذ است. عوامل تخلخل و نوع و مقدار یون‌ها تعیین‌کننده شدت انتشار کلرید در بتن هستند. در این مقاله علاوه بر مروری بر منابع، مدل ساده پیش‌بینی ضریب انتشار کلرید برای اولین بار ارائه شده است. براساس این مدل با تخمین رسان پذیری محلول منافذ و اندازه‌گیری مقاومت فشاری می‌توان انتشار کلرید در بتن را برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: انتشار کلرید، رسان پذیری، محلول منافذ، مدل انتشار.

* نویسنده مسئول: ghoddousi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

با وجود تعداد بسیار زیاد مقاله [۱-۶] در خصوص دوام بتن به ویژه خوردگی آرماتور در بتن و تلاش بیش از سه دهه پژوهشگران، هنوز ارزیابی بتن با دوام و پیش‌بینی عملکرد بتن در شرایط سخت محیطی یک چالش محسوب می‌شود. پیشرفت در مقایسه با ۳۰ سال پیش قابل چشمگیر است، اما هنوز پژوهش‌ها در سطح کشورمان و دنیا ادامه دارد تا قابلیت روش‌های ارزیابی دوام بتن بهبود و ارتقا یابد. هریک از روش‌های آزمایش ارزیابی و مدل‌های پیش‌بینی مزایا و محدودیت خود را دارند. به همین دلیل است که برای ارزیابی از چند روش متفاوت استفاده می‌شود. قانون فیک برای بتن ابداع نشده است و از طرف دیگر مدت آزمایش طولانی است و بین ۶۰ تا ۹۰ روز زمان لازم دارد. آزمایش‌های تسریع شده نیز به دلیل اعمال ولتاژ به نمونه‌ها و همچنین ایجاد دما در بتن به درستی شرایط واقعی را شبیه‌سازی نمی‌کنند. از طرف دیگر با استفاده از آزمایش‌های ساده‌تر مانند مقاومت الکتریکی بتن تلاش شده است تا مدت آزمایش تقلیل یابد.

در این مقاله که بخشی کوچکی از برنامه گسترده در دانشگاه علم و صنعت ایران است مدلی بر مبنای رسان پذیری محلول منافذ بتن و مقاومت فشاری برای تخمین ضریب انتشار کلرید ارائه شده است. اندازه‌گیری رسان پذیری محلول منافذ با دقت و آسانی امکان پذیر نیست. بنابراین مدل‌های دیگر از طریق اکسیدهای سیمان و مواد افزودنی معدنی و مدل‌های دیگر در حال بررسی است که در مقاله‌های دیگر یا گزارش تحقیقاتی منتشر شوند.

$$FF = \frac{\sigma_0}{\sigma} \quad (1)$$

رسان پذیری عکس مقاومت الکتریکی است. بنابراین عامل شکل‌گیری نسبت مقاومت الکتریکی بتن (ρ) به مقاومت الکتریکی محلول منافذ (ρ_0) است.

$$FF = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

بنابراین:

$$FF = \frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3)$$

رسان پذیری و مقاومت الکتریکی هر دو خاصیت بتن هستند که تابع نسبت آب به سیمان، حجم خمیر سیمان، مواد افزودنی معدنی و شیمیایی و درصد هیدراتاسیون است. واحد مقاومت الکتریکی اهم - متر ($\Omega\text{-m}$) و واحد رسان پذیری زیمنس^۳ بر متر است (S/m).

عامل شکل‌گیری بر اساس رابطه Nerst-Einstein به انتشار ارتباط دارد [۱۱]:

$$FF = \frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{D_0}{D} \quad (4)$$

که در آن:

$$D_0 = \text{ضریب خود انتشار گونه‌های یونی در آب (m}^2/\text{s)}$$

$$D = \text{ضریب انتشار در بتن (m}^2/\text{s)}$$

۳- تخمین رسان پذیری محلول منافذ بر اساس ترکیب

شیمیایی بتن

یون‌های K^+ ، Na^+ و هیدروکسید (OH^-) در محلول منافذ اثر چشمگیری در رسان‌پذیری محلول منافذ (σ_0) دارند. منشأ قلیایی‌های سدیم و پتاسیم بخشی از سولفات‌های قابل حل بر سطح ذرات سیمان است و بخش دیگر به مواد معدنی کلینکر پیوند یافته است. آن بخش از قلیایی که در سولفات حضور دارند، قبل از هیدراتاسیون رخ دهد، به محلول منافذ راه می‌یابد [۱۲].

به‌طور کلی رسان‌پذیری محلول منافذ تابع خود انتشار یون‌ها و اندرکنش یون‌ها است. بیشترین ضریب خود انتشار متعلق به OH^-

۲- عامل شکل‌گیری

در سال‌های اخیر بسیاری از تحقیقات درباره تخمین انتشار کلرید در بتن بر اساس رسان‌پذیری بدنه بتن و محلول منافذ انجام شده است. رسان‌پذیری محلول منافذ بتن و بدنه بتن با دو رویکرد شیمیایی و مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. در هر دو رویکرد، استفاده از عامل شکل‌گیری موثر است. عامل شکل‌گیری (FF^1) نسبت رسان‌پذیری^۲ محلول منافذ (σ_0) به رسان‌پذیری بتن (σ) است. این نسبت در سال ۱۹۴۲ توسط Archie به عامل شکل‌گیری (FF) نامیده شد [۷-۱۰].

³ Siemens

¹ Formation Factor

² Conductivity

جدول ۲- قلیایی‌ها محاسبه شده و اندازه‌گیری شده [۱۲ و ۱۸]

زمان (روز)	[Na ⁺ + K ⁺]	[OH ⁻] محاسبه شده	[OH ⁻] اندازه‌گیری شده
۳	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۲۷
۷	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۱
۲۸	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۴۷

Sanjuan و همکاران [۱۹] ضمن آن که چگونگی محاسبه کاتیون‌های Na⁺ و K⁺ را از اکسیدهای سیمان ارائه داده‌اند، یک مدل محاسبه OH⁻ را به نام تعادل شارژ^۱ را مطرح کردند. نتایج مدل خود را با فرمول ارائه شده توسط Helmuth و همکاران [۲۰] مقایسه کردند و حدود ۲۷ درصد تفاوت شناسایی شد.

مدل Sanjuan و همکاران [۱۹]:

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.6 \times ([\text{Na}^+] + [\text{K}^+])^2 \quad (7)$$

(۸)

$$[\text{OH}^-] = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] - (2 \times [\text{SO}_4^{2-}])$$

مدل Helmuth و همکاران [۲۰]:

$$[\text{OH}^-] = \frac{0.339[\text{Na}_2\text{O}_e]}{\text{سیمان/آب}} + 0.022 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \quad (9)$$

Na₂O_e معادل اکسیدهای قلیایی است.

$$[\text{Na}_2\text{O}_e] = [\text{Na}_2\text{O}] + 0.658 \times [\text{K}_2\text{O}] \quad (10)$$

هر دو مدل مقدار OH⁻ را برحسب mol/L محلول منافذ تعیین می‌کنند.

Scott و Alexander [۲۱] کاتیون‌های Na⁺, K⁺ و Ca²⁺ و محلول منافذ انواع بتن‌ها با مواد افزودنی معدنی را با استخراج محلول منافذ مورد بررسی قرار دادند. این پژوهشگران معتقدند که برای محاسبه یون هیدروکسید (OH⁻) بتن‌ها با دوده سیلیس باید طبق مقاله Berube و Duchesne [۲۲] از کاتیون Ca²⁺ استفاده شود. بنابراین:

$$[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + 2[\text{Ca}^{2+}] = [\text{OH}^-] \quad (11)$$

است. ضریب خود انتشار یون‌ها که توسط yuan-Hvi و Gregory [۱۳] به دست آمده است در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر ضریب خود انتشار گونه‌های یونی [۱۳]

گونه‌های یونی	ضریب خود انتشار D ₀ (10 ⁻¹⁰ m ² /s)		
	در دما های مختلف	۱۸ °C	۲۵ °C
Na ⁺	۶/۳	۱۱/۳	۱۳/۳
K ⁺	۹/۹	۱۶/۷	۱۹/۶
OH ⁻	۲۵/۶	۴۴/۹	۵۲/۷
Cl ⁻	۱۰/۱	۱۷/۱	۲۰/۳
SO ₄ ²⁻	۵/۰	۸/۹	۱۰/۷

تحقیقات گسترده‌ای در تعیین مقادیر قلیایی‌ها در محلول منافذ انجام شده‌اند که بخشی از تحقیقات با محاسبه شیمیایی بر مبنای اکسیدهای سیمان، تخمین مقادیر قلیایی را ارائه داده‌اند. اما بخش دیگر پژوهش با اندازه‌گیری مقادیر قلیایی در محلول منافذ را محور کار خود قرار دادند [۱۲، ۱۴ و ۱۵]. آن بخش از پژوهش که محاسبه شیمیایی انجام دادند، اکثراً بر مبنای تحقیق Taylor [۱۶] است. محاسبه شیمیایی منجر به رابطه ۵ شده است.

$$[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] = [\text{OH}^-] \quad (5)$$

هرچند Berube و Duchesne [۱۷] برای بتن حاوی دوده سیلیس، رابطه زیر را پیشنهاد دادند.

$$[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + 2[\text{Ca}^{2+}] = [\text{OH}^-] \quad (6)$$

به‌طور کلی مقادیر قلیایی‌ها در محلول منافذ تابع ترکیب سیمان پرتلند، مواد افزودنی معدنی و نسبت آب به سیمان دارد. همچنین سن بتن (درجه هیدراتاسیون) نقش اساسی در مقادیر قلیایی دارد. Eijk و Brouwers [۱۲ و ۱۸] در دو مقاله، مقادیر قلیایی را بر مبنای محاسبه شیمیایی Taylor [۱۶] و با ارائه مدل‌های اصلاح شده (به‌خصوص بر اساس پیوند قلیایی‌ها با محصولات هیدراتاسیون) و همچنین اندازه‌گیری قلیایی‌ها مقایسه کردند. در این تحقیقات از بتن معمولی با سیمان پرتلند استفاده شده است. بخشی از نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

¹ Charge Balance

روش‌های معمولی (حجمی و یا سطحی) اندازه‌گیری را انجام داد. اما اندازه‌گیری مستقیم رسان پذیری و یا مقاومت الکتریکی محلول منافذ تاکنون امکان پذیر نبوده است. اما به‌طور غیرمستقیم می‌توان از دو روش آزمایشگاهی و یا نظری تعیین کرد. هرچند هر دو روش خطا دارند، اما روش آزمایشگاهی با خطای کمتر است، اما اجرای آن سخت است.

روش آزمایشگاهی توسط Barney back و Diamond [۲۴] ابداع شده است. نمونه بتن تحت فشار زیاد قرار داده می‌شود و محلول منافذ استخراج می‌گردد. سپس با روش‌های معمول می‌توان رسان پذیری محلول را اندازه‌گیری کرد. روش دیگر آزمایشگاهی که به آسانی قابل اجرا است، قرار دادن سیستم حس‌گر در داخل مخلوط تازه بتن است و می‌توان مقاومت الکتریکی بین دو حسگر را اندازه‌گیری کرد [۲۵ و ۲۶].

در روش نظری که توسط Taylor [۱۶] مطرح شده است، ترکیب محلول منافذ بر اساس شیمی مواد سیمانی و درجه هیدراتاسیون تخمین زده می‌شود.

روش تخمین رسان‌پذیری الکتریکی محلول منافذ با دانستن قلیایی‌های محلول منافذ توسط Synder و همکاران [۱۵] و Sanjuan و همکاران [۱۹] ارائه شده است. بر اساس روش‌های مذکور، Bentz [۲۷ و ۲۸] تارنمایی را طراحی کرده است که به آسانی می‌توان رسان پذیری محلول منافذ را تخمین زد.

تخمین رسان پذیری الکتریکی محلول منافذ توسط Synder و همکاران [۱۵] ارائه شده است. روش پیشنهاد شده به شرح زیر است:

محاسبه رسان پذیری الکترولیت σ برحسب مجموع وزن داده شده رسان پذیری معادل λ_i هر یک از گونه‌های یونی برابر است با:

$$\sigma = \sum_i Z_i C_i \lambda_i \quad (12)$$

مقادیر Z_i و C_i به ترتیب نمره ظرفیت و غلظت مولار یون‌ها است. رسان پذیری معادل λ_i را می‌توان از معادله زیر حل کرد.

$$\lambda_i = \frac{\lambda^\circ}{1 + G_i I_M^{1/2}} \quad (13)$$

مقدار λ° رسان پذیری معادل یون‌ها در محلول نامحدود است. مقدار λ° برای یون‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

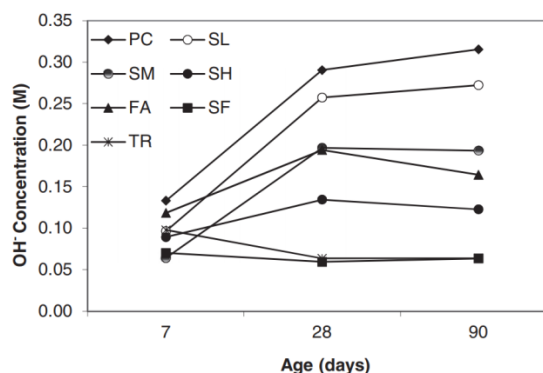
مقادیر غلظت کاتیون‌ها در ۹۰ روز طبق نتایج Scott و Alexander [۲۱] در جدول ۳ ارائه شده است. از نتایج مشخص است که کمترین مقدار K^+ و Na^+ متعلق به بتن با دوده سیلیس و بتن با افزودنی چندتایی است.

جدول ۳- غلظت کاتیون‌ها ۹۰ روزه (mg/lit) [۲۱]

نوع بتن	Ca^{2+}	Na^+	K^+
بتن با سیمان پرتلند	۴۰	۲۰۵۷	۸۴۴۹
بتن با سرباره	۲۳	۱۸۴۶	۷۰۳۸
بتن با خاکستر بادی	۲۴	۱۰۷۳	۴۱۹۵
بتن با دوده سیلیس	۵۰۶	۲۰۲	۷۸۸
بتن با مواد افزودنی چندتایی	۳۴۷	۳۰۱	۷۲۲

غلظت یون هیدروکسیل انواع بتن‌ها در سن‌های متفاوت در شکل ۱ نشان داده شده است. با افزایش سن نمونه‌ها، بر مقدار OH^- همه بتن‌ها به غیر از بتن حاوی دوده سیلیس (SF) و بتن با مواد افزودنی چندتایی (TR)، افزوده شده است.

معرف‌هایی که در شکل ۱ استفاده شده‌اند، ۵۰ درصد سرباره (SM)، ۲۵ درصد سرباره (SL)، ۷۵ درصد سرباره (SH)، خاکستر بادی (FA)، دوده سیلیس (SF)، چند مواد افزودن معدنی (TR) و سیمان پرتلند (PC) است.



شکل ۱- مقدار هیدروکسیل انواع بتن‌ها در سنین متفاوت [۲۱]

برای محاسبه عامل شکل‌گیری (FF) باید رسان پذیری بتن (σ) و رسان پذیری محلول منافذ (σ_0) و یا مقاومت الکتریکی بتن (ρ) و مقاومت الکتریکی محلول منافذ (ρ_0) تعیین و یا اندازه‌گیری شوند. رسان پذیری بتن را می‌توان طبق ASTM C1760 [۲۳] اندازه‌گیری کرد و یا مقاومت الکتریکی بتن را می‌توان از

می‌باید. دلیل این یافته‌ها در مقاله مذکور ذکر نشده است. اما کاملاً مشخص است که با افزایش نسبت آب به سیمان بر مقدار آب درون منافذ افزوده می‌شود، در نتیجه غلظت قلیایی‌ها کاهش می‌یابد و رسان پذیری محلول منافذ کاهش را نشان می‌دهد. از طرف دیگر فرض Synder و همکاران [۱۵] این است که یون‌ها در محلول بی‌نهایت قرار دارند. اما رسان پذیری بتن متفاوت است نه تنها تابع رسان پذیری محلول منافذ است، بلکه مشخصات منافذ شامل خم‌شدگی و مرتبط بودن تأثیر بسزایی دارند و از آنجایی که بخش فیزیک بتن در این مقاله ارائه نشده است از ارتباط عامل شکل‌گیری و مشخصات منافذ و تخلخل کل صرف نظر شده است و نیاز به مقاله دیگری است. جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان، عامل شکل‌گیری (FF) کاهش یافته است. نتایج جدول ۵ با فرض درجه هیدراتاسیون ۷۵ درصد و در سن ۲۸ روزه است.

بر اساس نظر Synder و همکاران [۱۵] رسان پذیری الکتریکی اکثر خمیر سیمان‌ها را می‌توان بر اساس شراکت یون‌های Na^+ ، K^+ و OH^- به‌طور دقیق محاسبه کرد. زیرا این یون‌ها در غلظت‌های چشمگیری در محلول منافذ وجود دارد (جدول ۴).

مقدار مقاومت یونی I_M بر اساس رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$I_M = \frac{1}{2} \sum_i Z_i^2 C_i \quad (14)$$

G_i ضریب رسان پذیری در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- رسان پذیری معادل نامحدود λ° و ضریب رسان

پذیری G در $25^\circ C$ [۱۵]

$G(\text{mol/L})^{-1/2}$	$Z\lambda^\circ$ ($\text{cm}^2 \text{ S/mol}$)	گونه‌های یون
۰/۳۵۳	۱۹۸	OH^-
۰/۵۴۸	۷۳/۵	K^+
۰/۷۳۳	۵۰/۱	Na^+
۰/۵۴۸	۷۶/۴	Cl^-
۰/۷۷۱	۵۹/۰	Ca^{2+}
۰/۸۷۷	۷۹/۰	SO_4^{2-}

بر اساس نتایج McCarter و همکاران [۲۹] که در جدول ۵ ارائه شده است، در تمام بتن‌ها، با افزایش نسبت آب به سیمان، رسان پذیری محلول منافذ کاهش می‌یابد، اما رسان پذیری بتن افزایش

جدول ۵- شاخص‌های رسان پذیری [۲۹]

بتن حاوی سرباره		بتن حاوی خاکستر بادی		بتن معمولی		شاخص‌های رسان پذیری
w/b		w/b		w/b		
۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۳۵	
۰/۰۱۶	۰/۰۳۵	۰/۰۵۴	۰/۱۲۰	۰/۰۴۱	۰/۰۹۱	σ_0 (S/m)
۰/۵۹	۰/۳۱	۲/۵۴	۱/۰۵	۲/۷۲	۱/۳۸	σ ($10^{-4} \times \text{S/m}$)
۲۷۱	۱۱۲۹	۲۱۳	۱۱۴۳	۱۵۱	۶۵۹	FF

گونه‌های یونی OH^- ، K^+ و Na^+ امکان تعیین مقاومت الکتریکی یا رسان پذیری محلول منافذ امکان‌پذیر می‌شود. محاسبه رسان پذیری محلول منافذ بر اساس روش Synder و همکاران در دانشگاه لیدز توسط McCarter و همکاران [۲۹] انجام شد. اما برای محاسبه رسان پذیری بتن از روش مقاومت الکتریکی سطحی استفاده گردید. خلاصه نتایج به شرح زیر است (جدول ۶ و ۷).

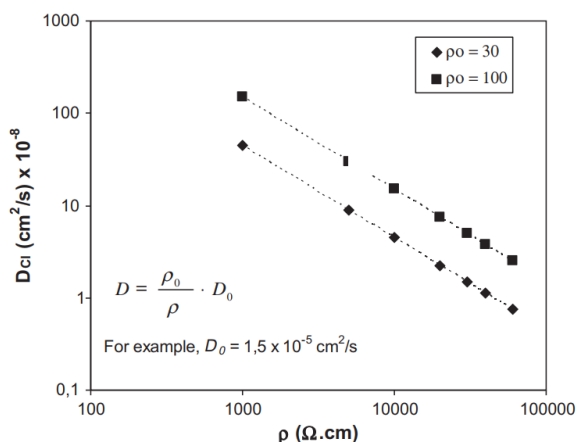
یون‌های دیگر مانند کلسیم و سولفات نیز در محلول منافذ وجود دارند، اما معمولاً غلظت کلسیم حدود 0.001 mol/L است که در مقایسه با قلیایی‌ها بسیار کم است و مقدار رسان پذیری آن حدود 0.003 S/m است. همچنین شراکت سولفات در رسان‌پذیری محلول منافذ حدود 0.25 S/m است که کمتر از ۲ درصد رسان‌پذیری کل است. بنابراین با معلوم بودن غلظت

که Q نتیجه RCPT به کلمب است. در شکل ۳ ارتباط عامل شکل گیری و مقدار RCPT را برای ۳ حالت مختلف مقاومت الکتریکی محلول منافذ نشان می دهد [۸].

بر اساس تقسیم بندی RCPT، مقادیر عامل شکل گیری توسط Weiss و همکاران [۸] توصیه شده است (جدول ۹). تقسیم بندی جدول ۹ با فرض مقاومت الکتریکی محلول منافذ $0.1 \Omega\text{-m}$ است.

جدول ۸- مقادیر k_{Cl} شرایط محیطی [۳۰ و ۳۱]

k_{Cl} ($\text{cm}^3\Omega/\text{year}$)	رده محیطی
۲۰۰	Xo
۱۰۰۰	XC1
۳۰۰۰	XC3
۵۰۰۰	XS1
۱۰۰۰	XS1 (بیشتر از ۵۰ متر از خط ساحلی)
۱۷۰۰۰	XS2 (کمتر از ۵۰ متر از خط ساحلی)
۲۵۰۰۰	XS3



شکل ۲- ارتباط بین مقاومت الکتریکی و انتشار کلرید

جدول ۹- ارتباط مقادیر RCPT (Q=کلمب) و عامل شکل گیری FF [۸]

FF	Q	تقسیم بندی RCPT
<۵۲۰	>۴۰۰۰	زیاد
۵۲۰-۱۰۴۰	۲۰۰۰-۴۰۰۰	متوسط
۱۰۴۰-۲۰۸۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	کم
۲۰۸۰-۲۰۸۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰	خیلی کم
>۲۰۸۰۰	<۱۰۰	قابل اغماض

جدول ۶- اکسید قلیایی ها

اکسید (درصد وزن)	سیمان پرتلند	خاکستر بادی	سرباره
K ₂ O	۰/۵۴	۱/۰	۰/۴۷
Na ₂ O	۰/۰۸	۰/۲	۰/۲۵

جدول ۷- رسان پذیری محلول

گونه های یونی	λ° ($\text{cm}^2\text{S/mol}$)	G(mol/L)
Na ⁺	۵۰/۱	۰/۷۳۳
K ⁺	۷۳/۵	۰/۵۴۸
OH ⁻	۱۹۸	۰/۳۵۳

۴- ارتباط انتشار کلرید و رسان پذیری با رویکرد مقاومت الکتریکی

بسیاری از پژوهشگران تلاش کردند که بین انتشار کلرید و رسان پذیری بتن و یا رسان پذیری محلول منافذ ارتباط برقرار کنند. Andrade و همکاران [۳۰ و ۳۱] رابطه انتشار کلرید و مقاومت الکتریکی و یا رسان پذیری بتن را طبق فرمول زیر ارائه دادند.

$$D_e = \frac{k_{Cl}}{\rho_e} \quad (15)$$

که در آن:

$$D_e = \text{انتشار کلرید (cm}^3\text{/s)}$$

$$\rho_e = \text{مقاومت الکتریکی (}\Omega\text{-cm)}$$

$$k_{Cl} = \text{عامل محیطی (cm}^3\Omega\text{/year)}$$

k_{Cl} بر اساس شرایط محیطی تعیین می شود که طبق جدول ۸ است. رده بندی شرایط محیطی مطابق با آیین نامه ایران (آبا) است. همچنین ارتباط مقاومت الکتریکی انتشار کلرید در شکل ۲ نشان داده شده است.

در چند سال اخیر عامل شکل گیری به عنوان شاخص دوام بتن توصیه شده است [۸ و ۹]. Weiss و همکاران [۸] ارتباط مقدار آزمایش تسریع شده نفوذپذیری کلرید (RCPT)^۱ با مقاومت الکتریکی (ρ) را ارائه دادند.

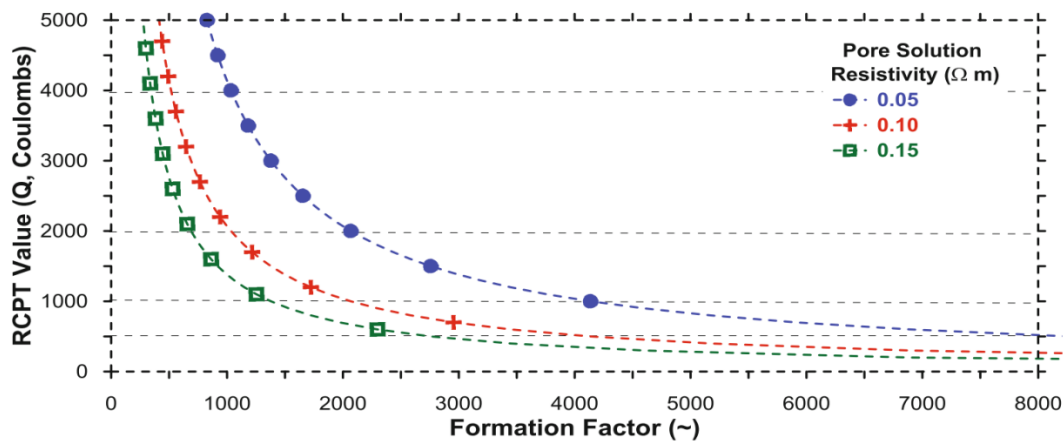
$$\rho = \frac{206830}{Q} \quad (16)$$

^۱ Rapid Chloride Permeability Test

مروری بر منابع ضریب انتشار کلرید در ...

مبنای تارنمای NIST [۲۸] را تعیین کردند. این تحقیق بر روی انواع بتن‌های معمولی و حاوی مواد افزودنی معدنی انجام پذیرفت. بر مبنای نتایج به دست آمده، تقسیم‌بندی نفوذپذیری بتن را طبق جدول ۱۰ انجام دادند. در شکل ۴ نیز ارتباط رسان پذیری و RCPT را نشان می‌دهد.

Obla و همکاران [۳۲] ارتباط بین RCPT طبق ASTM C1202 [۳۳]، رسان پذیری بتن بر اساس ASTM C1760 [۲۳]، آزمایش مهاجرت کلرید سریع (RMT) AASHTO TP64 [۳۴] که در اروپا به آزمایش NT Build 429 [۳۵] موسوم است را ارائه دادند. همچنین رسان پذیری محلول منافذ بر



شکل ۳- ارتباط عامل شکل‌گیری و RCPT [۸]

جدول ۱۰- سطح نفوذپذیری کلرید و معیارهای آزمایش [۳۲]

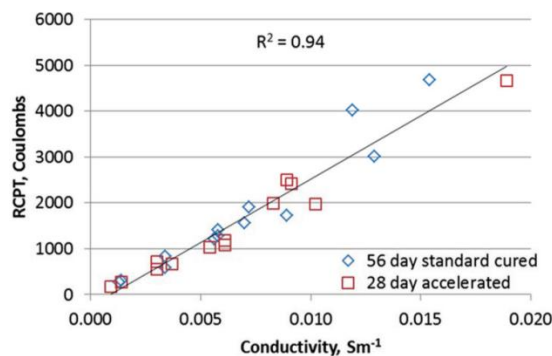
رسان پذیری بتن S/m	RMT mm/(V-h)	RCPT (کلمب)	سطح نفوذپذیری کلرید
≤ 0.0045	≤ 0.012	≤ 1000	خیلی کم
0.0045 تا 0.0084	0.012 تا 0.024	1000 تا 2000	کم
≥ 0.0084	≥ 0.024	≥ 2000	متوسط

[۳۶] ارائه شد (شکل ۵). هرچند به نظر نمی‌آید که صرف ساختار فیزیکی بتن و ضریب انتشار کلرید ارتباط معنی‌داری باشد. اما پس‌از این پژوهشگران مدل‌های متعددی را در ارتباط با خصوصیات منافذ بتن و نفوذپذیری بتن ارائه شده است که مهم‌ترین آن‌ها مدل Katz و Thompson [۳۷] است. fib [۳۸] نیز ضریب نفوذپذیری کلرید را به مقاومت فشاری ارتباط داده است و این رابطه را تقریبی می‌داند.

$$D_{cl^-} = \frac{5 \times 10^{-9}}{f_{cm}^{1.5}} \quad (17)$$

برای سیمان حاوی سرباره نیز مدل زیر را توصیه کرده است:

$$D_{cl^-} = \frac{5 \times 10^{-8}}{f_{cm}^{2.5}} \quad (18)$$



شکل ۴- ارتباط RCPT و رسان پذیری بتن [۳۲]

۵- ارتباط ضریب انتشار و مقاومت فشاری

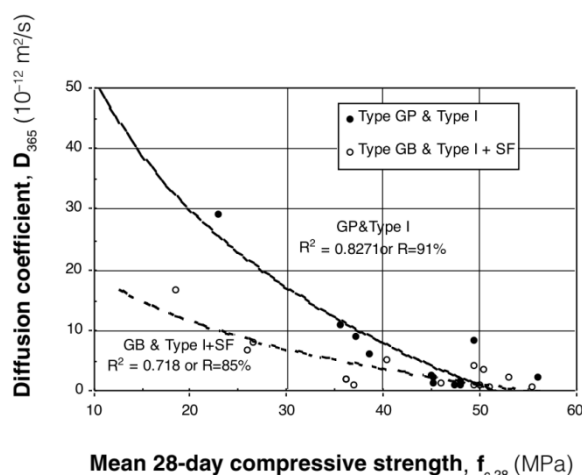
شاید بتوان اظهار کرد که اولین بار ارتباط بین مقاومت فشاری و ضریب انتشار کلرید در سال ۱۹۹۶ توسط Sherman و همکاران

¹ Rapid Migration Test

که در آن‌ها:

$$D_{cl} = \text{ضریب انتشار مؤثر (m}^2/\text{s)}$$

$$f_{cm} = \text{مقاومت فشاری میانگین (MPa)}$$



شکل ۵- ارتباط مقاومت فشاری و ضریب انتشار کلرید [۳۶]

۶- پیشنهاد مدل

همان‌طور که در بخش ۵ ذکر شد، مدل‌هایی که فقط ارتباط مقاومت فشاری و ضریب انتشار کلرید را ارائه می‌دهند از ضعف ارتباط ساختار فیزیکی بتن با انتشار کلرید رنج می‌برد. انتشار کلرید نه تنها وابسته به ساختار منافذ و تخلخل بتن است، بلکه بر رسان پذیری بتن و محلول منافذ استوار است. بر همین اساس با استفاده از داده‌هایی که در دانشگاه علم و صنعت ایران به دست آمده است [۳۹ و ۴۰]، یک مدل ساده ارائه شده است. بخشی از نتایج این تحقیق [۳۹ و ۴۰] در جدول ۱۱ ارائه شده است. در این تحقیق برای اندازه‌گیری رسان پذیری محلول منافذ از دستگاه مخصوص رسان پذیری یون‌های موجود در سیمان یا میکروسیلیس استفاده شده است. اما می‌توان از تارنمای NIST [۲۸] یا با برآورد شیمیایی طبق بند ۳ رسان پذیری محلول منافذ را تخمین زد.

جدول ۱۱- مشخصات و خواص بتن‌ها [۳۹ و ۴۰]

شماره	نوع بتن	نسبت آب به سیمان	مقاومت فشاری (MPa)	رسان پذیری محلول منافذ S/m	ضریب انتشار کلرید اندازه‌گیری شده (10 ⁻¹² m ² /s)	ضریب انتشار کلرید محاسبه شده (10 ⁻¹² m ² /s)
۱	بتن با سیمان پرتلند	۰/۳۵	۵۰	۱/۸	۸	۵
۲	بتن با سیمان پرتلند	۰/۴۵	۳۵	۲/۲	۱۲	۱۰
۳	بتن با سیمان پرتلند	۰/۵۵	۳۰	۳/۶	۱۸	۲۱
۴	بتن با دوده سیلیس	۰/۳۵	۶۵	۱/۲	۰/۵	۲/۳
۵	بتن با دوده سیلیس	۰/۴۵	۵۰	۱/۵	۱	۴/۲
۶	بتن با دوده سیلیس	۰/۵۵	۴۲	۱/۷	۶/۵	۶/۲۵
۷	بتن با متاکائولن	۰/۴۵	۶۵	۰/۷	۰/۵	۰/۹۵
۸	بتن با دوده سیلیس و متاکائولن	۰/۴۵	۷۸	۰/۳	۰/۲	۰/۳

$f_c =$ مقاومت فشاری نمونه بتن (MPa) در شکل ۶ و جدول ۱۱ مقادیر ضریب انتشار کلرید اندازه‌گیری شده، با ضریب انتشار کلرید محاسبه شده نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این ارتباط معنی‌دار و خطی است.

پس از ارائه مدل، تقریباً تمام مقاله‌های مربوط مورد بررسی قرار گرفتند تا امکان تأیید مدل بر مبنای نتایج مقاله‌ها فراهم شود. اما تمام مقاله‌های مورد بررسی یا رسان پذیری محلول منافذ را ارائه داده بودند، اما مقاومت فشاری نمونه‌ها گزارش نشده بود. به هر

مدل بدیع که برای تخمین ضریب انتشار کلرید ارائه شده است، بر اساس فرمول ۱۹ است. این مدل قبلاً در هیچ مقاله‌ای منتشر نشده است.

$$D = \frac{\rho_0 * 1000}{f_c^{1.5}} \quad (19)$$

که در آن:

$$D = \text{ضریب انتشار کلرید}$$

$$\rho_0 = \text{رسان پذیری محلول منافذ (S/m)}$$

on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement." *Cement and Concrete Composites* 31, no. 1, 2009, 2-11.

[2] Cai, Y., Zhang, W., Yu, L., Chen, M., Yang, C., François, R. and Yang, K. "Characteristics of the steel-concrete interface and their effect on the corrosion of steel bars in concrete." *Construction and Building Materials*, 253, 2020, 1-13.

[3] Sandra, N., Kawaai, K. and Ujike, I. "Influence of copper slag on corrosion behavior of horizontal steel bars in reinforced concrete column specimen due to Chloride-induced corrosion." *Construction and Building Materials*, 255, 2020, 1-14.

[4] Fodil, Dif, and Mouli, M. "Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments." *Construction and Building Materials* 179, 2018, 25-34.

[5] Dehwah, H. A. F. "Corrosion resistance of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash." *Construction and Building Materials*, 37, 2012, 277-282.

[6] Umar Khan, M., Ahmad, S., Al-Gahtani, H., j. "Chloride-induced corrosion of steel in concrete: an overview on chloride diffusion and prediction of corrosion initiation time." *International journal of corrosion*, 2017.

[7] Archie, G. E. "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics." *Transactions of the AIME* 146, no. 01, 1942, 54-62.

[8] Weiss, W. J., Barrett, T. J., Qiao, C., & Todak, H. "Toward a specification for transport properties of concrete based on the formation factor of a sealed specimen." *Advances in Civil Engineering Materials* 5, no. 1. 2016, 179-194.

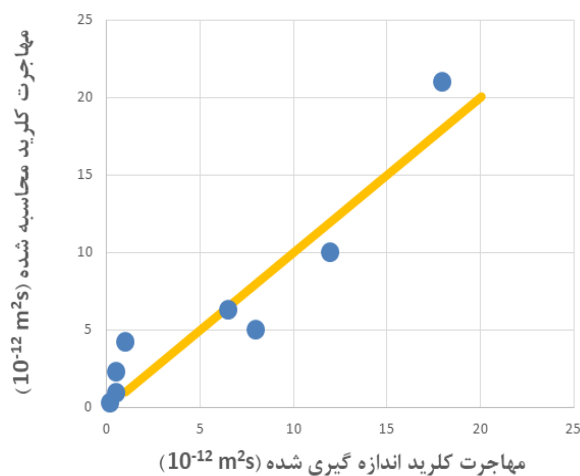
[9] Weiss, W. J., Spragg, R. P., Isgor, O. B., Ley, M. T., & Van Dam, T. "Toward performance specifications for concrete: linking resistivity, RCPT and diffusion predictions using the formation factor for use in specifications." In *High tech concrete: Where technology and engineering meet*, Springer, Cham, 2018, 2057-2065.

[10] Snyder, K. A. "The relationship between the formation factor and the diffusion coefficient of porous materials saturated with concentrated electrolytes: theoretical and experimental considerations.", 2000.

[11] Nokken, M. R., and R. D. Hooton. "Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete." *Materials and Structures*, 41, no. 1, 2008. 1.

[12] Van Eijk, R. J., and H. J. H. Brouwers. "Prediction of hydroxyl concentrations in cement pore water using a numerical cement hydration

حال از سه عامل، مقاومت فشاری، رسان پذیری محلول منافذ و یا ضریب انتشار کلرید، یک عامل در مقاله‌ها ارائه نشده بود.



شکل ۶- ارتباط ضریب انتشار اندازه گیری شده و محاسبه شده

۷- نتیجه گیری

- هریک از آزمایش‌های ارزیابی کلرید در بتن از مزایا و معایب برخوردار است. مهم‌ترین معایب روش‌های ارزیابی، طولانی بودن مدت و یا استفاده از آزمایش‌های تسریع شده است که با شرایط واقعی متفاوت است.

- در گذشته مدل‌های پیش‌بینی ضریب انتشار کلرید بر اساس فیزیک بتن مانند مشخصات منافذ و یا تخلخل کل استوار بود. اما در سال‌های اخیر توجه بیشتری به شیمی بتن مانند مقدار قلیایی‌ها در محلول منافذ و رسان پذیری محلول منافذ و کل بتن شده است. شاخص عامل شکل‌گیری (نسبت رسان پذیری محلول منافذ به رسان پذیری بتن) امروزه مورد توجه قرار گرفته است. اما تا به امروز روش‌های تعیین رسان‌پذیری محلول منافذ از دقت کافی برخوردار نیستند.

- به نظر می‌آید مدلی برای پیش‌بینی ضریب انتشار کلرید لازم است که خصوصیات فیزیک و شیمی بتن را در نظر بگیرد. به همین دلیل، در دانشگاه علم و صنعت ایران تحقیقات گسترده در حال انجام است. از طرف دیگر تمرکز بر انتشار کلرید اما بدون توجه به عملکرد خوردگی آرماتور در بتن منجر به ارزیابی بتن و ارائه دقیق مدل نمی‌شود.

۸- مراجع

[1] Ghods, P., O. B. Isgor, G. McRae, and T. Miller. "The effect of concrete pore solution composition

- [26] Rajabipour, F., & Weiss, J. "Electrical conductivity of drying cement paste." *Materials and Structures*, 40, no. 10, 2007, 1143-1160.
- [27] Bentz, D. P. "A virtual rapid chloride permeability test." *Cement and Concrete Composites*, 29, no. 10, 2007, 723-731.
- [28] (www.nist.gov/el/materials-and-structural-systems-division-73100/inorganic-materials-group-73103/estimation-pore);
- [29] McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Starrs, G., Basheer, P. M., Nanukuttan, S., Srinivasan, S., & Magee, B. J. "A durability performance-index for concrete: developments in a novel test method." *International Journal of Structural Engineering*, 6, no. 1, 2015, 2-22.
- [30] Beushausen, H., & Luco, L. F. "Performance-based specifications and control of concrete durability." *RILEM TC*, 2016.
- [31] Vennesland, Ø., Climent, M. Á., & Andrade, C. "Recommendation of RILEM TC 178-TMC: Testing and modelling chloride penetration in concrete." 2013.
- [32] Obla, K. H., Lobo, C. L., & Kim, H. "Tests and criteria for concrete resistant to chloride Ion penetration." *ACI Materials Journal*, 113, no. 5, 2016, 621-631.
- [33] ASTM C1202-12, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 8 pp.
- [34] AASHTO, TP. "64-03. Standard method of test for prediction of chloride penetration in hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure." Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2003.
- [35] NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest method, 1999.
- [36] Sherman, M. R., McDonald, D. B., & Pfeifer, D. W. "Durability aspects of precast prestressed concrete. Part 2: chloride permeability study." *PCI journal* 41, no. 4, 1996, 76-95.
- [37] Katz, A. J., and A. H. Thompson. "Quantitative prediction of permeability in porous rock." *Physical review B* 34, no. 11, 1986, 8179.
- [38] Walraven, J. "fib Model Code for Concrete Structures 2010: mastering challenges and encountering new ones." *Structural Concrete*, 14, no. 1, 2013, 3-9.
- [39] Ghoddousi, P, and Saadabadi, L.A. "Pore structure indicators of chloride transport in metakaolin and silica fume self-compacting model." *Cement and concrete research*, 30, no. 11, 2000, 1801-1806.
- [13] Yuan-Hui, Li, and Sandra Gregory. "Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments." *Geochimica et cosmochimica acta*, 38, no. 5, 1974, 703-714.
- [14] Rajabipour, F., & Weiss, J. "Electrical conductivity of drying cement paste." *Materials and Structures*, 40, no. 10, 2007, 1143-1160.
- [15] Snyder, K. A., Feng, X., Keen, B. D., & Mason, T. O. "Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH⁻, K⁺ and Na⁺ concentrations." *Cement and Concrete Research*, 33, no. 6, 2003, 793-798.
- [16] Taylor, Harry FW. "A method for predicting alkali ion concentrations in cement pore solutions." *Advances in Cement Research* 1, no. 1, 1987, 5-17.
- [17] Duchesne, J., and M. A. Bérubé. "The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms part 2: pore solution chemistry." *Cement and Concrete Research*, 24, no. 2, 1994, 221-230.
- [18] Brouwers, H. J. H. "Alkali concentrations of pore solution in hydrating OPC." *Cement and Concrete Research*, 33, no. 2, 2003, 191-196.
- [19] Sanjuán, M. Á., Estévez, E., & Argiz, C. "Alkali ion concentration estimations in cement paste pore solutions." *Applied Sciences*, 9, no. 5, 2019, 992.
- [20] Helmuth, R., Stark, D., Diamond, S., & Moranville-Regourd, M. "Alkali-silica reactivity: an overview of research." *Contract* 100, 1993, 202.
- [21] Scott, A., and M. G. Alexander. "Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments." *Cement and Concrete Research*, 89, 2016, 45-55.
- [22] Duchesne, J., and M. A. Bérubé. "Evaluation of the validity of the pore solution expression method from hardened cement pastes and mortars." *Cement and Concrete Research*, 24, no. 3, 1994, 456-462.
- [23] ASTM C1760, "Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [24] Barneyback Jr, R. S., and Sidney Diamond. "Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars." *Cement and Concrete Research*, 11, no. 2, 1981, 279-285.
- [25] Rajabipour, F., Sant, G., & Weiss, J. "Development of electrical conductivity-based sensors for health monitoring of concrete materials." In *TRB Annual Conference*, 2007, p. 16.

concrete." International Journal of Civil Engineering, 16, no. 5, 2018, 583-592.

[۴۰] عادل زاده سعد آبادی، لیلا، بررسی مکانیسم حرکت یون‌های کلرید در بتن خودتراکم حاوی ترکیب چند ماده افزودنی معدنی، رساله دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۶.

Literature review on Coefficient of Chloride diffusion in Concrete and Propose the novel model

Parviz Ghoddousi *

Professor in Iran university of Science and Technology.

Abstract

Corrosion of reinforcement in concrete structure is the main factor of determination in the world. Therefore evaluation of concrete on durability base is essential for construction in coast of Persian Gulf and Oman sea. The most important test method is measurement or prediction of diffusion coefficient of concrete. There are different direct and indirect methods for determining of diffusion coefficient. The methods include, chloride profile and Fick law, rapid chloride permeability test, conductivity, and resistivity. Formation factor is considered as an important indicator of concrete performance against chloride diffusion. Because this indicator contains both the resistivity of the concrete and resistivity of the pore solution. In otherwords, the formation factor indicates the amount of porosity in the concrete and the type and amount of ions in the pores. The porosity and ions determine the intensity of chloride diffusion in concrete. The target of researchers is to achieve accurate diffusion methods or proposing simple models, in last 30 years. In this paper beside literature review, a novel and simple model for prediction of diffusion is presented.

Keywords: Chloride diffusion, Conductivity, Pore solution, Diffusion model.

* Corresponding Author: ghoddousi@iust.ac.ir