

روش شناسایی تدابیر پیشگیرانه طراحی اجزای پلهای بتنی در مجاورت محیط های خورنده

محمد کاظم شربتدار¹، احسان کاشی²، محسن هاشمی مطلق³

1- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه سمنان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری دانشگاه سمنان

3- کارشناس عمران و عضو انجمن علمی عمران دانشگاه آزاد سمنان

E-mail : eng_eki@yahoo.com

خلاصه

بخش عمده ای از عملیات نگهداری راهها مربوط به نگهداری ابنیه فنی می باشد و در این بین پل ها به دلیل حساسیت سازه ای و نقش کلیدی در عبور ترافیک از اهمیت بالایی برخوردارند ، یکی از خطراتی که همواره یک تهدید جدی برای سازه های بتنی و علی الخصوص اجزای پلهای بتنی می باشد ، پدیده خوردگی آرماتورهای بتن می باشد این عامل زمانی که بتن در مجاورت محیط های خورنده نظیر مجاورت با دریا قرار گیرد تشدید میابد ، همچنین برخی ترکیبات مورد استفاده به منظور یخ زدایی در عملیات نگهداری زمستانی باعث خوردگی می گردد ، در کشور ما به دلیل مجاورت با دریا از شمال و جنوب سازه های ساحلی از اهمیت بالایی برخوردارند و همچنین شرایط آب و هوایی و یخبندان در برخی مناطق کشور و متعاقب آن یخ زدایی با نمک و سایر ترکیبات مشابه همواره یک هشدار برای سازه های بتنی مجاور این محیط ها می باشد ، لذا ضرورت توجه به نگهداری پیشگیرانه بتن در برابر محیط های خورنده به چشم می آید . در این مقاله ضمن معرفی عمده مواردی که باعث بوجود آمدن محیط های خورنده می گردند به بررسی و شناسایی روش طراحی پیشگیرانه به منظور محافظت از اجزای پل های بتنی در مجاورت محیط های خورنده بیان گردیده و روابط و جداول مربوط به برآورد طول عمر مفید پل بتنی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: خوردگی بتن ، محیط خورنده ، عرشه پل ، یخ زدایی ، یون کلر

مقدمه

خرابی های ناگهانی اجزای پل های بتنی همواره یک مشکل برای پیمانکاران راهسازی و سازمان های راهداری می باشد . منشا این خرابی ها عواملی مانند استفاده از نمک در زمستان ، قرارگرفتن در محیط های خورنده مجاور دریا که منجر به خوردگی بتن می گردد ، زنگ زدگی آرماتورهای بتن مسلح و متعاقباً ورقه ورقه شدن کاور بتن می باشد . اخیراً پیشگیری قبل از خرابی اجزای بتنی پل ها ، به خصوص عرشه پل ها با روشهای پیشگیرانه مختلف در سراسر کشور آغاز شده ، نگرانی حفاظت از آرماتورها در برابر خوردگی باعث توسعه این روشها شده است. علاوه بر افزایش پوشش آرماتورها عمده روشهای پیشگیرانه رایج عبارتند از : کاهش نفوذ پذیری بتن ، استفاده از پوشش اپوکسی ، استفاده از آرماتور های گالوانیزه شده و استفاده از مواد محافظ در برابر خوردگی در ترکیبات بتن .

این مقاله به توصیف شناسایی روشی برای پیش بینی عمر سرویس دهی با توجه به نوع مشخصی از تدابیر پیشگیرانه و محیط های خورنده می پردازد . تدابیر پیشگیرانه اصولاً بر پایه راهکار جلوگیری نفوذ مواد خورنده به اجزای پل بتنی از سطح بتن به آرماتورها می باشد. این مقاله برای

¹ استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه سمنان

² دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری دانشگاه سمنان

³ کارشناس عمران و عضو انجمن علمی عمران دانشگاه آزاد سمنان

شناسایی روش و برآورد طول عمر با توجه به روش پیشگیرانه در محیط های خورنده مختلف ارائه شده است که می تواند برای طراحی روش حفاظت از اجزای پل بتنی برای دستیابی به طول عمر دلخواه بکار برده شود .

توصیف روش شناسایی

بالا بردن حفاظت در مقابل خوردگی اصولاً با افزایش کاور بتن همراه است. راه اصلی انتقال یون های کلراید از سطح بتن به آرماتورها با قانون نفوذپذیری ، با توجه به تمرکز یون های کلر در یک فاصله معین از سطح بتن پس از زمانی مشخص ، قابل توجیه می باشد . این روش اصولاً برای بتن های غوطه ور در آب دریا که دائماً با نمک آن در تماسند کاربرد دارد . اطلاعات مورد نیاز روش ، ثابت انتشار بتن است که به نفوذپذیری و دمای بتن بستگی دارد . و همچنین به میزان غلظت یون کلر در آب محیط اطراف بتن بستگی دارد .

هنگامی که بتن در معرض آب دریا قرار می گیرد ، سطح آن به سرعت با کلر آب دریا اشباع می گردد که میزان غلظت یون کلر به میزان کلر موجود در آب دریا بستگی دارد . در روش دوم از نمک به منظور یخ زدایی بتن های در معرض خوردگی استفاده شده است . در این نمونه غلظت کلر در سطح بتن با افزایش استعمال نمک افزایش یافته تا آن سطوح فراتر از ثابت انتشار در نظر گرفته شوند .

زمان خوردگی با مفهوم نفوذ

رابطه نشان داده شده در زیر ، معادله Fick's بر اساس قانون نفوذ می باشد :

$$C(x,t) = C(o) \{ 1 - \text{erf}[(x)/(2\sqrt{Dct})] \} \quad \text{رابطه 1-}$$

$C(x,t)$: بیان کننده میزان غلظت یون کلر (بر حسب Kg/m^3) در عمق x (سانتیمتر یا اینچ) بعد از زمان t (بر حسب سال)

C_o : غلظت یون کلر در سطح (بر حسب Kg/m^3)

Dc : ثابت نفوذ یون کلر (بر حسب cm^2/yr)

erf : خطای تابع (از جداول ریاضی استاندارد ، جدول 1)

اگر در رابطه 1 $C(x,t)$ ، ماکسیمم خوردگی یون کلر 0/9 کیلوگرم در متر مکعب باشد و x عمق پوشش باشد ، t زمان خوردگی آرماتورها خواهد بود . باید توجه داشت که اگر یون کلر در بتن وجود داشته باشد به پتانسیل خوردگی کمک می کند ، $C(x,t)$ ممکن است کمتر از حجم یون کلر معمول آن باشد .

محاسبه مناسب مقدار عمق پوشش ، ضریب ثابت انتشار و غلظت سطحی یون کلر در برآورد طول عمر بکار رفته در رابطه 1 ضروری است . این پارامتر ها برای تیپ های بتن پل ها می تواند بسیار قابل ملاحظه باشد . پس رسیدگی به این پارامتر ها برای هر ترکیب بتنی و محیطی ضروری می باشد.

ضخامت پوشش آرماتور ها برای رابطه نفوذ

کاور در نظر گرفته شده در رابطه 1 ، (x) بایستی از مقدار آن برای طراحی کمتر باشد زیرا میزان آن در زمان اجرا تغییر می کند . خوردگی از محلی که لایه پوشش آرماتور کمتر است آغاز می شود . کاور در نظر گرفته شده در رابطه 1 بر اساس توزیع عمق پوشش می باشد و در مناطقی که کاهش عمق قابل اغماض باشد می تواند قبل از زیاد شدن تعمیر گردد .

اگر فرض شود که 95% یا بیشتر از سطح عرشه پل برای دوره سرویس دهی مؤثر باید عاری از خوردگی باشد ، کاور بکار رفته باید 5 درصد از کاور طراحی باشد .

بازدید های کارگاهی از عرشه پلهای بتنی نشان داده است که 5% سطح عرشه ، کاوری کمتر از میزان در نظر گرفته شده برای طراحی ، تقریباً برابر 1/27 سانتی متر داشته اند . [1] بر این اساس میزان پوشش بکار رفته در رابطه 1 برای عرشه پل ها همانطور که در ذیل نشان داده شده است تخمین زده شده است :

$$x = (\text{cm}) - 1/27 (\text{cm}) = \text{ضخامت کاور طراحی}$$

جدول 1- مقدار خطای تابع "y" برای آرگومان "y"

| y | erf y | y | erf y | y | erf y |
|------|---------|------|---------|------|---------|
| 0.02 | 0.02256 | 1.02 | 0.85084 | 2.02 | 0.99572 |
| 0.04 | 0.04511 | 1.04 | 0.85865 | 2.04 | 0.99609 |
| 0.06 | 0.06762 | 1.06 | 0.86614 | 2.06 | 0.99642 |
| 0.08 | 0.09008 | 1.08 | 0.87333 | 2.08 | 0.99673 |
| 0.10 | 0.11246 | 1.10 | 0.88021 | 2.10 | 0.99702 |
| 0.12 | 0.13476 | 1.12 | 0.88679 | 2.12 | 0.99728 |
| 0.14 | 0.15695 | 1.14 | 0.89308 | 2.14 | 0.99753 |
| 0.16 | 0.17901 | 1.16 | 0.89910 | 2.16 | 0.99775 |
| 0.18 | 0.20093 | 1.18 | 0.90484 | 2.18 | 0.99795 |
| 0.20 | 0.22270 | 1.20 | 0.91031 | 2.20 | 0.99814 |
| 0.22 | 0.24430 | 1.22 | 0.91553 | 2.22 | 0.99831 |
| 0.24 | 0.26570 | 1.24 | 0.92051 | 2.24 | 0.99846 |
| 0.26 | 0.28690 | 1.26 | 0.92524 | 2.26 | 0.99861 |
| 0.28 | 0.30788 | 1.28 | 0.92973 | 2.28 | 0.99874 |
| 0.30 | 0.32863 | 1.30 | 0.93401 | 2.30 | 0.99886 |
| 0.32 | 0.43913 | 1.32 | 0.93807 | 2.32 | 0.99897 |
| 0.34 | 0.36936 | 1.34 | 0.94191 | 2.34 | 0.99906 |
| 0.36 | 0.38933 | 1.36 | 0.94556 | 2.36 | 0.99915 |
| 0.38 | 0.40901 | 1.38 | 0.94902 | 2.38 | 0.99924 |
| 0.40 | 0.42839 | 1.40 | 0.95229 | 2.40 | 0.99931 |
| 0.42 | 0.44747 | 1.42 | 0.95538 | 2.42 | 0.99938 |
| 0.44 | 0.46623 | 1.44 | 0.95830 | 2.44 | 0.99944 |
| 0.46 | 0.48466 | 1.46 | 0.96105 | 2.46 | 0.99950 |
| 0.48 | 0.50275 | 1.48 | 0.96365 | 2.48 | 0.99955 |
| 0.50 | 0.52050 | 1.50 | 0.96611 | 2.50 | 0.99959 |
| 0.52 | 0.53790 | 1.52 | 0.96841 | 2.52 | 0.99963 |
| 0.54 | 0.55494 | 1.54 | 0.97059 | 2.54 | 0.99967 |
| 0.56 | 0.57162 | 1.56 | 0.97263 | 2.56 | 0.99971 |
| 0.58 | 0.58792 | 1.58 | 0.97455 | 2.58 | 0.99974 |
| 0.60 | 0.60386 | 1.60 | 0.97635 | 2.60 | 0.99976 |
| 0.62 | 0.61941 | 1.62 | 0.97804 | 2.62 | 0.99979 |
| 0.64 | 0.63459 | 1.64 | 0.97962 | 2.64 | 0.99981 |
| 0.66 | 0.64938 | 1.66 | 0.98110 | 2.66 | 0.99983 |
| 0.68 | 0.66378 | 1.68 | 0.98249 | 2.68 | 0.99985 |
| 0.70 | 0.67780 | 1.70 | 0.98379 | 2.70 | 0.99987 |
| 0.72 | 0.69143 | 1.72 | 0.98500 | 2.72 | 0.99988 |
| 0.74 | 0.70468 | 1.74 | 0.98613 | 2.74 | 0.99989 |
| 0.76 | 0.71754 | 1.76 | 0.98719 | 2.76 | 0.99991 |
| 0.78 | 0.73001 | 1.78 | 0.98817 | 2.78 | 0.99992 |
| 0.80 | 0.74210 | 1.80 | 0.98909 | 2.80 | 0.99992 |
| 0.82 | 0.75381 | 1.82 | 0.98994 | 2.82 | 0.99993 |
| 0.84 | 0.76514 | 1.84 | 0.99074 | 2.84 | 0.99994 |
| 0.86 | 0.77610 | 1.86 | 0.99147 | 2.86 | 0.99995 |
| 0.88 | 0.78669 | 1.88 | 0.99216 | 2.88 | 0.99995 |
| 0.90 | 0.79691 | 1.90 | 0.99279 | 2.90 | 0.99996 |
| 0.92 | 0.80677 | 1.92 | 0.99338 | 2.92 | 0.99996 |
| 0.94 | 0.81627 | 1.94 | 0.99392 | 2.94 | 0.99997 |
| 0.96 | 0.82542 | 1.96 | 0.99443 | 2.96 | 0.99997 |
| 0.98 | 0.83423 | 1.98 | 0.99489 | 2.98 | 0.99997 |
| 1.00 | 0.84270 | 2.00 | 0.99532 | 3.00 | 0.99998 |

برآورد ثابت نفوذ

به دلیل نبود یک ثابت نفوذ Dc برای یک ترکیب بتنی مخصوص پل ، روش ذیل می تواند برای تخمین ثابت نفوذ بکار رود :
 گام 1- استفاده از جدول 2 [2] برای برآورد بار الکتریکی قابل عبور از بتن در آزمایش سرعت نفوذ پذیری (ASHTO T-277) در فصل ستون ها . برای تخمین بار برای بتن های قابل قبول ، نسبت آب به سیمان بکار می رود . برای بتنی که سیلیکافوم در آن بکار رفته (5% وزن سیمان یا بیشتر) نفوذ پذیری یون کلر خیلی کم یا ناچیز بسته به میزان نفوذپذیری بکار می رود .

جدول 2- تفسیر نتایج آزمایش سرعت نفوذ پذیری یون کلر [2]

| نوع بتن | بار الکتریکی عبوری (بر حسب کولن) | نفوذ پذیری یون کلر |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| نسبت آب به سیمان 0/6 یا بیشتر | 4000 | بالا |
| نسبت آب به سیمان 0/4 تا 0/5 | 2000 - 4000 | متوسط |
| نسبت آب به سیمان کمتر از 0/4 | 1000 - 2000 | پایین |
| بتن اصلاح شده با لاستیک خام | 100 - 1000 | خیلی کم |
| بتن پلیمری | 100 | قابل چشم پوشی |

گام 2- استفاده از بار الکتریکی ستونهای گام 1 برای استفاده در رابطه تجربی ذیل جهت تخمین ثابت نفوذ در واحد cm^2/yr . [3]

$$\text{رابطه 3- } D_c = (0.003204)^{0/84} (\text{سرعت نفوذ در ستون ها})$$

باید توجه داشت که رابطه 3 بر اساس مجاورت بتن در دمای ثابت 22 درجه سانتیگراد محاسبه شده است . ضریب ثابت نفوذ با کمترین افزایش دما ، افزایش می یابد . گزارشات نشان می دهند که تغییر دما به میزان 10 درجه سانتیگراد ، D_c را با ضریب 2/33 تغییر خواهد داد . [3] بر این اساس رابطه زیر جهت سازگاری D_c با دمای کارگاهی پیشنهاد شده است :

$$\text{رابطه 4- } D_c(T) = D_c [2.33^{(T-22)/10}]$$

ثابت نفوذ تنظیم شده با دمای کارگاه $D_c(T) =$
 $T =$ ، متوسط سالیانه دمای کارگاه $^{\circ}\text{C}$

همچنین باید توجه داشت که رابطه 3 بر اساس تست نمونه های آزمایشگاهی است و تاثیر مثبت عمل آوری را بر روی نفوذ پذیری بتن نشان نمی دهد . [4]، [5] بر اساس تحقیقات مقدار کمتری از D_c نشان داده شده است و پیشنهاد شده که نتایج حاصل از رابطه 3 و 4 جهت بیان واقع بینانه از نفوذ پذیری طولانی مدت بتن در کارگاه ، تقسیم بر 2 شود .

برآورد غلظت یون کلر در سطح

گام 1- جهت برآورد غلظت یون کلر در سطح بتن C_o لازم است تا شدت قرارگیری در مجاورت بتن محاسبه گردد . شدت یون کلر در مجاورت عرشه پلها با میزان نمک مورد استفاده به منظور یخ زدایی در جدول زیر دسته بندی شده است : [4]

| شدت مجاورت با یون کلر | میزان استفاده از نمک |
|-----------------------|----------------------------|
| کم | < 2.5 tons/lane-mile/yr |
| متوسط | 2.5-5.0 tons/lane-mile/yr |
| زیاد | 5.0-10.0 tons/lane-mile/yr |
| شدید | > 10.0 tons/lane-mile/yr |

برای سازه هایی که در مجاورت آب دریا قرار دارند ، جدول 3 میزان یون کلر را بر اساس میزان کلر آب دریا و فاصله از سطح آب نشان می دهد : [4]

جدول 3- نمونه سازه های در مجاورت آب شور [4]

| موقعیت اجزای پل نسبت به آب دریا | کم | متوسط | زیاد | شدید |
|--|--------|-------------|--------------|---------|
| در تماس با خاک یا آب ، میزان کلر موجود در آب (ppm) | < 500 | 500 - 1000 | 1000 - 2000 | > 2000 |
| کمتر از 12 اینچ بالاتر از ارتفاع میانگین مد ، میزان کلر موجود در آب (ppm) | < 500 | 500 - 1000 | 1000 - 2000 | > 2000 |
| بالاتر از آب صرفنظر از میانگین ارتفاع مد دریا، میزان کلر موجود در آب (ppm) | < 1500 | 1500 - 3000 | 3000 - 6000 | > 6000 |
| در فاصله 0/5 مایل از آب دریا ، میزان کلر موجود در آب (ppm) | < 3000 | 3000 - 6000 | 6000 - 12000 | > 12000 |

گام 2- نهایتاً جدول ذیل می تواند برای تخمین غلظت سطحی یون کلر در رابطه 1 ، برای رده مشخصی از یون کلر بکار رود: [4]

شدت فرارگیری در مجاورت عوامل خورنده

کم
متوسط
زیاد
شدید

حجم یون کلر سطح Co

3.0 lb/cy (1.8 kg/m³)
6.0 lb/cy (3.5 kg/m³)
9.0 lb/cy (5.3 kg/m³)
12.0 lb/cy (7.1 kg/m³)

مثال کاربردی

مثال زیر نحوه استفاده از نظریه نفوذ را برای پیش بینی طول عمر مؤثر عرشه پل های بتنی قابل پذیرش و آرماتورها در محیط خورنده نمکی نشان می دهد .

مثال :

چند سال طول می کشد تا 5% عرشه پلی که در محیطی با متوسط کاربرد سالیانه 2/3 تن در هر خط در کیلومتر نمک به منظور یخ زدایی ، خورده شود ؟ کاور 6/35 سانتیمتر و نسبت آب به سیمان 0/43 و متوسط دمای سالیانه کارگاهی 15 درجه سانتیگراد می باشد .

حل :

زمان نفوذ برای 5% آرماتورها از رابطه 1 محاسبه میگردد :

$$C(x,t) = C(o) \{ 1 - \text{erf}[(x)/(2\sqrt{Dct})] \}$$

t = تعداد سالیانی که 5% از عرشه پل دچار خوردگی شود

$$C(x,t) = \text{سطح آستانه خوردگی یون کلر} = 0.9 \text{ kg/m}^3 (1.5 \text{ lb/cy})$$

$C_o = 3.5 \text{ kg/m}^3 (6.0 \text{ lb/cy})$ = سطح متوسط بر اساس رده بندی یون کلر متناسب با کاربرد سالیانه نمک یخ زدا

$D_c = 0.65 \text{ cm}^2/\text{yr} (0.10 \text{ in.}^2/\text{yr})$ = به منظور برآورد D_c ابتدا از جدول 2 استفاده می کنیم و سپس سرعت نفوذ پذیری برای نسبت آب به سیمان 0/43 با درون یابی ستون 2600 انتخاب شده ، سپس این مقدار در رابطه 3 قرار داده و D_c برابر $2.37 \text{ cm}^2/\text{yr}$ بدست می آید .

D_c بدست آمده باید با دمای 15 درجه مطابق رابطه 4 اصلاح گردد ، رابطه 4 ثابت نفوذ را به میزان $1.30 \text{ cm}^2/\text{yr}$ می دهد . نهایتاً مقدار فوق تقسیم بر 2 می شود تا تاثیر نفوذ پذیری بلند مدت در طول عمل آوری اعمال گردد .

$x = 5.08 \text{ cm} (2.00 \text{ in.})$ بر اساس رابطه 2 ، 5% از سطح عرشه پل دارای کوری کمتر از 5/08 دارد .

سپس از رابطه 1 داریم :

$$0.90 = 3.5 \{ 1 - \text{erf}[(5.08)/(2 \sqrt{0.65t})] \}$$

$$0.26 = 1 - \text{erf}[(2.54)/(\sqrt{0.65 t})]$$

$$\text{erf}[(2.54)/(\sqrt{0.65 t})] = 0.74$$

از جدول ۱ برای $y = 0.80$, $\text{erf}(y) = 0.74$

$$[(2.54)/(\sqrt{0.65 t})] = 0.80 \quad \text{سپس :}$$
$$t = 16 \text{ years}$$

بنابر این 16 سال طول می کشد تا 5% سطح عرشه پل شروع به خوردگی کند . زمان بین خوردگی و لایه لایه شدن کاور حدوداً 3 سال است . طول عمر عرشه پل $16+3=19$ سال خواهد بود . مشخصات این دوره زمانی رضایت بخش نیست و روش طراحی برای رسیدن به عمر سرویس دهی 50 سال و یا بیشتر باید تغییر کند .

راهکارهای افزایش عمر سرویس دهی

- 1- استفاده از بتن با نفوذپذیری کم مثل بتن های با ترکیب سیلیکافوم و سرعت نفوذ 1000 کولن یا کمتر
- 2- استفاده از پوشش اپوکسی برای آرماتورها
- 3- استفاده از آرماتورهای با روکش گالوانیزه
- 4- استفاده از مواد محافظ خوردگی در ترکیبات بتنی

در ادامه روش شناسایی ، تخمین طول عمر بتن های دارای شرایط فوق بحث خواهد شد :

-تاثیر بتن با نفوذپذیری کم

برآورد طول عمر بتن با نفوذپذیری کم همانند ترکیب بتن قابل قبول است . بدیهی است استفاده از بتن با نفوذپذیری کم باعث کاهش زیاد ثابت نفوذ و رسیدن به طول عمر بالاتر می شود .

- تاثیر استفاده از پوشش اپوکسی

اخیراً تحقیقی در ایالات متحده نشان داده است که استفاده از پوشش اپوکسی بطور چشمگیری روند بهتری در محیط خورنده داشته است . باید توجه شود که پوشش اپوکسی عملکرد بهتری در محیط های کلریدی یخ زدا نسبت به محیط های کلریدی آب دریا دارند . در نشریات مربوطه اطلاعات کافی در دسترس نیست تا دقیقاً نتایج تاثیر کاربرد پوشش اپوکسی را بر روی طول عمر نشان دهد . پیمانکاران نیاز دارند تا بر اساس تجربیات خود عملکرد پوشش اپوکسی را بر روی طول عمر ارزیابی کنند ، در نبود اطلاعات کافی ، از سوی مؤلفین یک میزان قراردادی 15 ساله برای تخمین عمر سرویس دهی عرشه پل های در معرض محیط کلریدی ، پیشنهاد شده است که به عدد بدست آمده از رابطه 1 اضافه می گردد .

- تاثیر استفاده از آرماتورهای گالوانیزه

گالوانیزه کردن یک پروسه کنترل شده است که از روکش روی برای آبکاری فولاد بکار می رود . حفاظت گالوانیزه به فولاد از دو جهت برتری می دهد : محافظت و پیشگیری حفاظت کاتدی تحقیقات محدود آزمایشگاهی نشان داده است که میزان خوردگی در حالتی که از آرماتورهای گالوانیزه استفاده شده 2/5 برابر کمتر آرماتورهای معمولی می باشد .

- تاثیر استفاده از مواد محافظ خوردگی در ترکیبات بتنی

نیترات کلسیم یک ماده معدنی رایج پیشگیری کننده در برابر خوردگی است. نیترات کلسیم معمولاً بصورت مایع با 30% سختی است. نیترات کلسیم می تواند در میزان مختلف جهت حفاظت در سطح های گوناگون اضافه شود. شرکت های تولید کننده اطلاعات جدول ذیل را جهت راهنمایی تهیه می کنند. [7] بصورت یکنواخت در رده 10 تا 25 l/m3 (2 to 5 gal/cy) اضافه می شود.

| Chlorides lbs/cy | Calcium Nitrite Gallons/cy |
|------------------|----------------------------|
| 6 | 2 |
| 9/9 | 3 |
| 13 | 4 |
| 15 | 5 |
| 16 | 6 |

برای برآورد طول عمر بتن نیترات کلسیمی $C(x,t)$ در رابطه 1 باید بطور منطقی افزایش یابد و ماکسیمم یون کلر ترکیب بر اساس میزان نیترات کلسیم مشخص می شود. باید توجه داشت که افزایش میزان یون کلر همانطور که در بالا گفته شد می تواند سبب افزایش قابل توجه عمر سرویس دهی گردد. صرفنظر از میزان یون کلر موجود در محیط وجود میزان مشخصی از نیترات کلسیم می تواند عمر مفید 50 سال و یا بیشتر را فراهم کند. اهمیت موضوع تاثیر طولانی نیترات کلسیم در محیط قلیایی بتن است.

- تخمین طول عمر سرویس دهی عرشه پل بتنی

روش توصیف شده در این مقاله برای تخمین عمر سرویس دهی مؤثر یک پل فرضی بکار رفته است که شامل 5 تدبیر حفاظت و 4 نوع مختلف از محیط خورنده است که نتایج آن در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4- برآورد طول عمر عرشه پل بتنی با تدابیر پیشگیرانه مختلف (میزان رشد خوردگی در هر سال 5%)

| تدابیر شدت محیط | W/O محافظت (1) | کاهش نفوذ پذیری 1000 کولن (2) | کاهش نفوذ پذیری 500 کولن (2) | کاهش نفوذ پذیری 100 کولن (2) | میلگردهای با پوشش اپوکسی (3) | میلگردهای آبکاری شده (4) |
|--------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| کم (5) | 45 سال | > 50 سال | > 50 سال | > 50 سال | > 50 سال | > 50 سال |
| متوسط (6) | 20 سال | 45 سال | > 50 سال | > 50 سال | > 35 سال | > 50 سال |
| زیاد (7) | 15 سال | 30 سال | 40 سال | > 50 سال | > 30 سال | > 35 سال |
| شدید (8) | 10 سال | 25 سال | 35 سال | > 50 سال | > 25 سال | > 25 سال |

توجه: برآورد طول عمر در جدول فقط بر اساس مفروضات ساختگی پایین می باشند و ممکن است با تغییر فرضیات، کاهش یا افزایش پیدا کنند. برای محاسبه ضریب انتشار میانگین دمای سالیانه حوزه برابر 15 درجه سانتیگراد استفاده گردید. عرشه های در محیط های سردتر و گرم تر به ترتیب طول عمر کمتر و بیشتری خواهند داشت.

مفروضات:

- 1- ضخامت کاور بتن برابر 2/5 اینچ و نسبت آب به سیمان برابر 0/43
- 2- ضخامت کاور بتن برابر 2/5 اینچ و بتن با نفوذ پذیری کم در این ستون ها نشان داده شده است.
- 3- ضخامت کاور بتن برابر 2/5 اینچ و نسبت آب به سیمان برابر 0/43 و فرض می گردد به علت پوشش اپوکسی دست کم 15 سال عمر آن بیشتر شود.

4- ضخامت کاور بتن برابر $2/5$ اینچ و نسبت آب به سیمان برابر $0/43$ و فرض می شود محتوی یون کلر در آستانه خوردگی دست کم $2/2 \text{ kg/m}^3$ باشد .

5- استفاده از نمک برای یخ زدایی سالیانه کمتر از $1/4 \text{ tons/lane-km}$

6- استفاده از نمک برای یخ زدایی سالیانه بین $1/4-2/9 \text{ tons/lane-km}$

7- استفاده از نمک برای یخ زدایی سالیانه بین $2/9 - 5/8 \text{ tons/lane-km}$

8- استفاده از نمک برای یخ زدایی سالیانه بیشتر از $5/8 \text{ tons/lane-km}$

نتیجه گیری

روشهای مختلفی جهت مقابله با خوردگی بکار می روند که هر کدام از این روشها مزایا و محدودیتهای خاص خود را دارند . روش توصیف شده در این مقاله برای تخمین عمر سرویس دهی مؤثر یک پل فرضی بکار رفته است که شامل 5 نوع تدبیر حفاظتی و 4 نوع مختلف از محیط خوردنده است که نتایج آن در جدول 4 نشان داده شده است . برآورد طول عمر بر اساس جدول 4 فقط بر اساس مفروضات ذکر شده می باشند و ممکن است با تغییر فرضیات ، کاهش یا افزایش پیدا کنند . برای محاسبه ضریب انتشار میانگین دمای سالیانه حوزه برابر 15 درجه سانتیگراد استفاده گردید . عرشه های در محیط های سردتر و گرم تر به ترتیب طول عمر کمتر و بیشتری خواهند داشت . منشا خوردگی و فساد تدریجی بتن عواملی مانند استفاده از نمک در زمستان به منظور یخ زدایی ، قرارگرفتن در محیط های خوردنده مجاور دریا که منجر به خوردگی بتن می گردد ، زنگ زدگی آرماتورهای بتن مسلح و متعاقباً ورقه ورقه شدن کاور بتن می باشد . راهکارهای افزایش عمر سرویس دهی شامل : استفاده از بتن با نفوذپذیری کم مثل بتن های با ترکیب سیلیکافوم ، استفاده از پوشش اپوکسی برای آرماتورها ، استفاده از آرماتورهای با روکش گالوانیزه ، استفاده از مواد محافظ خوردگی در ترکیبات بتنی می باشد که بسته به شرایط منطقه می توان از هر یک از آنها استفاده کرد . ضمناً روابط ارائه شده جهت محاسبه طول عمر مفید پل بتنی صرفاً بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مطالعه میدانی یک نمونه خاص می باشد و برای استناد به این روابط باید مطالعات در سطح وسیعتری صورت پذیرد .

مراجع

1. Babaei, K., and Hawkins, N.M., "Evaluation of Bridge Deck Protective Strategies," NCHRP Report 297, Transportation Research Board, National Research Council, 1987.
2. Whiting, D., "Rapid Measurement of the Chloride Permeability of Concrete," Public Roads, 1981.
3. Berke, N.S., and Hicks, M.S., "Estimating the Life of Reinforced Concrete Decks and Marine Piles Using Diffusion and Corrosive Data." Corrosion Forms and Control for Infrastructure, ASTM STP 1137.
4. Weyers, R>E., et al, "Concrete Bridge Protection, Repair, and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion," Report No. SHRP-S-360, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.
5. Sherman, M.R., McDonald, D.B., Pfeifer, D.W., "Durability Aspects of Precast Prestressed Concrete. Part 2: Chloride Permeability Study," PCI Journal, July/August 1996.
6. S.R., Yeomans, "Performance of Black, Galvanize, and Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Chloride Contaminated Concrete." Corrosion Engineering, NACE International, Jan. 1994.
7. Manual for Corrosion Protection of Concrete in Bridges, "AASHTO-AGC-ARTBA, Subcommittee on New Highway Materials, Task Force 32, Feb. 1992.