تحقیقات بتن
سال دهم، شمارهٔ دوّم
تابستان ۹۶
ص ۴۵ – ۳۳
تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۲۲
تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱۵

مروری بر نگرش جدید در ارزیابی دوام یخبندان سازه‌های بتنی

محمود نیلی *
دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
علیرضا آذریون
دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بوعلی سینا
سید مهدی حسینیان
استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

محققین تکنولوژی بتن تلاش های مستمری را در جهت تخمین عمر سرویس سازه های بتنی زیر بنائی از جمله سد ها، عرشه پل ها و روسازی های بتنی در مناطق یخبندان صورت داده اند. در تحقیقات انجام گرفته عموما آزمونه‌ها فقط در مقابل سیکل های یخ زدن و آب شدن مورد ارزیابی قرار گرفته اند و در نتیجه تفاوت آشکاری بین نتایج آزمایش ها و عملکرد واقعی سازه های بتنی مشاهده گردیده است. این تفاوت ها عمدتا از این واقعیت ناشی می‌گردد که شرایط بارگذاری و تنش های ایجاد شده نقشی در ملاحظات روش آزمایش ها ندارند و نتایج قابل اطمینانی از آزمایش ها بدست نمی‌آیند. تغییر نگرش استاندارد ها در مبانی طراحی سازه‌های بتنی و عبور محققین از آزمایش‌های معمولی که در آن‌ها صرفا آزمونه‌های بتنی در مقابل سیکل‌های یخ زدن و آب شدن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند باعث گردیده است که مدل‌های ارائه شده فعلی قادر به ایجاد حاشیه ایمنی لازم در طراحی نباشند و هنوز پایگاه گسترده ای با نتایج آزمایشگاهی قابل اطمینان در دسترس نمی باشد. بنابراین در حال حاضر، نیاز مبرمی به توسعه آزمایشات بر مبنای عملکرد که در آن‌ها چند مکانیزم خرابی به‌صورت ترکیبی دیده شده است احساس می‌گردد. در نوشتار حاضر سعی بر آن است تا مروری بر مطالعات انجام شده با انتخاب مهمترین ترکیب بارهای محیطی و مکانیکی محتمل در مناطق سردسیر صورت گیرد تا دید روشنی از رفتار واقعی سازه بتنی در معرض محیط مهاجم برای مهندسین فراهم گردد و آغازی باشد بر مطالعات پیچیده آتی که در آن‌ها به مکانیسم های خرابی بتن با نگرش ترکیب بار و سیکل‌های یخ زدن و آب شدن پرداخته خواهند شد.

واژه‌های کلیدی: سیکل‌های یخ زدن و آب شدن ، دوام، عمر سرویس، عوامل ترکیبی، اثرات همزمان.

* نویسنده مسئول: nili36@yahoo.co.uk

۱- مقدمه

زمان زیادی بود که ، طراحی سازه‌های بتن مسلح با توجه به بارهای سرویس استاتیکی یا دینامیکی، بارهای باد یا برف، بارهای ضربه ای و یا ترکیب آن‌ها انجام می گرفت. در این شیوه طراحی غیر واقع بینانه و صرفا سازه‌ای، ضخامت پوشش میل گردها تنها براساس اطمینان از انتقال نیرو از بتن به فولاد بدون شکل گیری بیش از اندازه ترک‌ها محاسبه می-گردید و نقش محافظت کننده آن نادیده گرفته می‌شد. درنتیجه، الزامات دوامی بتن در طراحی منظور نمی گشت. تا اواسط دهه ۷۰ میلادی، عقیده غالب محققین این بود که طراحی سازه‌ای مناسب ، عمر سرویس قابل قبولی نیز برای سازه بتنی تأمین خواهد کرد.

در سال‌های اخیر، با ملاحظه عمر سرویس نسبتا کم بسیاری از سازه‌های بتنی، طراحی بر اساس دوام به یک نیاز فوری تبدیل گردیده است. برای انجام این طراحی، شیوه های گوناگونی مانند روش‌های کیفی، روش‌های احتمالاتی و غیراحتمالاتی مبتنی بر مدل تدوین گردیده‌اند [۴-۱]. طراحی بر اساس دوام یک گام تعیین کننده به سمت افزایش عمر سرویس و ساخت و ساز با دوام بیشتر است، هرچند هنوز از دیدگاه برخی مهندسین سازه که به روش طراحی سازه ای خو گرفته‌اند غیر ضروری انگاشته می‌شود. عوامل تخریب بتن می‌توانند محیطی و یا مکانیکی باشند. گروه نخست عمدتا مشتمل بر عوامل شیمیایی موجود در محیط خورنده مانند اسیدها و نمک‌ها و یا عوامل فیزیکی است، در حالی‌که اثر بارهای خارجی در گروه دوم قرار داده می‌شوند (جدول ۱).

جدول ۱- مهمترین عوامل موثر بر دوام بتن [۵]

نوع بار		عامل
محیطی	شیمیایی	نمک های یخ زدا، سولفات، اسید،کربناسیون و واکنش سیلیسی/قلیایی
	فیزیکی	سیکل‌های یخ زدن وآب شدن، سیکل‌های تر و خشک شدن و فرسایش
مکانیکی		فشار، کشش، برش و پیچش

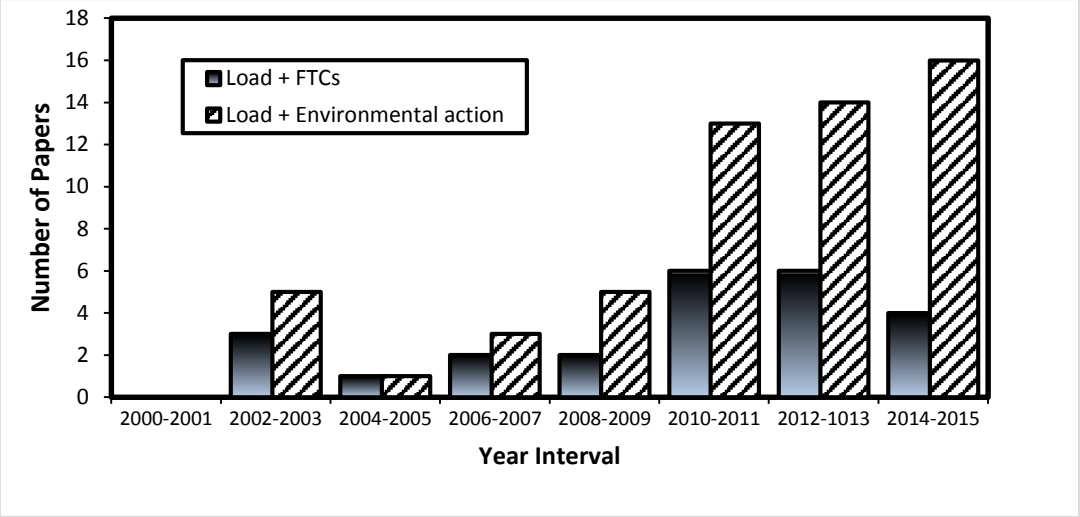
به هر حال، در روش‌های فعلی طراحی دوام، یک عامل محیطی مخرب غالب و یا چند عامل مجزا مانند کربناسیون، نفوذ کلراید و یا سیکل‌های یخ زدن-آب شدن در نظر گرفته می‌شوند و از تاثیر بار مکانیکی صرفنظر می گردد. هرچند در سازه‌های واقعی، عموما بتن در معرض ترکیبی از چند عامل مختلف واقع می‌شود. در چنین شرایطی می‌توان انتظار داشت که تخریب بتن در اثر عوامل ترکیبی به نحو قابل ملاحظه‌ای تشدید گردد. مطالعات متعدد بیانگر کاهش قابل ملاحظه عمر سرویس سازه های بتنی در معرض ترکیب عوامل مخرب می-باشند [۷، ۶]. برای درک بهتر، می‌توان مثال ساده ای در نظر گرفت: بارهای مکانیکی، حتی در یک سطح متوسط، سبب ایجاد ریز ترک هایی در ساختار مرکب و متخلخل بتن می گردند. ریزترک‌های جدید می‌توانند به عنوان مسیرهای جدید برای انتقال آب، کلراید یا دی اکسید کربن به درون بتن عمل کنند. درنتیجه، نرخ خرابی تسریع و عمر سرویس تحت اثر این عوامل کاهش خواهد یافت. این اثرات ترکیبی به‌طور گسترده‌ای نادیده گرفته شده اند [۹، ۸].

با این‌حال، مطالعات درمورد ترکیب عوامل مخرب بر بتن از سال ۱۹۸۶ در چندین کشور آغاز گردید [۱۲-۱۰]. در سال ۲۰۱۱، اتحادیه بین‌المللی معتبر رایلم[1] ،کمیته جدید TC-TDC [۱۳] را به منظور تدوین روش‌های آزمایشگاهی بررسی دوام بتن تحت اثرات ترکیبی عوامل محیطی و بار مکانیکی تأسیس نمود. با توجه به امکان تأثیر دو یا چند عامل مخرب به‌طور همزمان یا متوالی، تعداد ترکیب عوامل محتمل بسیار زیاد می‌باشند. در مناطق سردسیر، مهمترین حالات ترکیبی شامل سیکل‌های یخ زدن وآب شدن به همراه تأثیر بار خارجی با یا بدون اثر عوامل شیمیایی می-باشد که مکررا در سازه‌های واقعی دیده شده است [۱۴]. روند افزایشی مطالعات ترکیبی دوام به تفکیک مکانیکی-محیطی و مکانیکی- سیکل‌های یخ زدن وآب شدن را می‌توان از شکل ۱ استنباط نمود. در مقاله حاضر، مروری بر روش‌های مختلف مورد استفاده آزمایشگاهی به‌منظور لحاظ کردن اثرات ترکیبی بار مکانیکی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن انجام گرفته است که می‌تواند در گزینش روش آزمایش مناسب راهگشا باشد.

۲- ترکیب اثرات بار و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن

سیکل‌های یخ زدن وآب شدن ، یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی با تأثیر مخرب بر عملکرد سازه‌های بتنی در مناطق سردسیر می باشند. از آنجایی که این سازه‌ها عموما باربر هستند، ترکیب تنش مکانیکی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن در اغلب موارد عملی اتفاق می‌افتد.

[1] RILEM



شکل ۱- تعداد مقالات انتشار یافته در رابطه با دوام ترکیبی مکانیکی-محیطی و مکانیکی- سیکل‌های یخ زدن وآب شدن در پایگاه Scopus

هردو این عوامل مسبب خرابی فیزیکی در بتن می‌باشند که با گذشت زمان افزایش می‌یابد . لذا ضروری است تا این خرابی مورد ارزیابی واقع شود. متداول‌ترین روش ارزیابی دوام بتن، ASTM C666 [۱۵] می‌باشد. طبق این استاندارد، بتنی که مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی آن قبل از ۳۰۰ سیکل به ۰/۶ یا کمتر برسد دارای دوام یخبندان کافی نمی‌باشد. مسئله اساسی در این آزمایش، انجام آن بر روی آزمونه‌های بدون اثر بار خارجی است. در شرایط واقعی مناطق سردسیر، اغلب سازه‌ها مانند پل‌ها و رویه-های راه در شرایط تحت بار متحمل سیکل‌های یخ زدن وآب شدن می‌شوند. بنابراین، اگر یک آزمونه بتنی بدون اثر بار و فاقد هوا بتواند ۶۰٪ مدول الاستیسیته دینامیکی خود را قبل از ۳۰۰ سیکل حفظ کند، تضمینی وجود ندارد که رفتار آن تحت اثر همزمان تنش ناشی از بار نیز به همین صورت باشد. علی رغم این ایراد آشکار، تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است[۱۶].

۳- وضعیت ترکیب بار

به منظور مطالعه اثر ترکیب بارهای محیطی و مکانیکی، ابتدا باید دو حالت مختلف را از یکدیگر متمایز کرد (جدول۲):

(۱) ترکیبات متوالی

در این وضعیت، ابتدا آزمونه بتنی تحت اثر خرابی ناشی از سیکل های یخ زدن وآب شدن قرار گرفته، سپس خرابی ناشی از بار مکانیکی را تحمل می‌کند. این فرایند می‌تواند با ترتیب معکوس (ابتدا خرابی ناشی از بار مکانیکی و سپس خرابی ناشی از سیکل های یخ زدن وآب شدن) نیز انجام گیرد. به نظر می‌رسد روش آزمایش-با وجود سهولت قابل ملاحظه- انطباق مناسبی با شرایط واقعی ندارد و نمی‌توان آن را یک "ترکیب" به معنای حقیقی آن تلقی نمود. خصوصا در حالت مورد اشاره در بالا (تأثیر بار خارجی بعد از سیکل‌های یخ زدن وآب شدن)، تشکیل یخ ممکن است باعث استحکام منافذ و بالا رفتن مقاومت بتن شود [۱۷]. هرچند، تعداد کمی از محققین تلاش کرده‌اند با انجام هر دو حالت آزمایش بار-سیکل یخ زدن وآب شدن و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن-بار، این روش را اصلاح نمایند [۲۰-۱۸].

(۲) ترکیبات همزمان

این وضعیت دارای بیشترین انطباق با شرایط واقعی سازه بتنی قرار گرفته در منطقه سردسیر می‌باشد. آزمونه‌های بتنی در یک محفظه با شرایط دمایی کنترل شده، تحت اثرات همزمان تنش حاصل از بار خارجی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن قرار می‌گیرند. مسئله اساسی در این وضعیت، نوع تنشی است که باید با اثرات یخ زدن وآب شدن ترکیب شود.

جدول ۲- وضعیت های مهم ترکیب بارها در مناطق سردسیر

وضعیت	حالات مختلف
متوالی	بار ⟹ سیکل یخ زدن/آب شدن
	سیکل یخ زدن /آب شدن ⟹ بار
همزمان	بار ✚ سیکل یخ زدن/آب شدن
	بار ✚ سیکل یخ زدن/ آب شدن ✚ عامل شیمیایی

۴- تأثیر نوع تنش

در عمل، یک عضو قرار گرفته در سازه بتن مسلح ممکن است تحت اثرتنش های محوری، برشی یا خمشی واقع شده باشد. در برخی حالات، تنش های چند محوره یا ترکیبی نیز مشاهده می گردد. همچنین باید بین تنش های موثر در زمانی کوتاه، تنش های ناشی از بارهای متناوب و تنش های دائمی تفاوت قائل شد. با توجه به موجود نبودن یک روش استاندارد، تکنیک های مورد استفاده جهت بررسی دوام و عمر سرویس بتن تحت اثرات ترکیبی را می توان به چهار گروه تقسیم بندی کرد:

(۱) ترکیب اثر سیکل‌های یخ زدن وآب شدن با تنش فشاری [۲۴-۲۱]،

(۲) ترکیب اثر سیکل‌های یخ زدن وآب شدن با تنش کششی [۲۶-۲۵، ۱۸] ،

(۳) ترکیب اثر سیکل‌های یخ زدن وآب شدن با تنش خمشی سه نقطه ای یا چهار نقطه ای [۳۱-۲۷، ۱۶،۱۷] ،

(۴) ترکیب اثر سیکل‌های یخ زدن وآب شدن با تنش خمشی سه نقطه ای یا چهار نقطه ای و عوامل شیمیایی [۳۸-۳۲].

تعدادی از روش‌های آزمایش مورد استفاده در مطالعه اثرات ترکیبی بار مکانیکی و سیکل های یخ زدن وآب شدن در شکل‌های ۲-الف تا ۲- د نشان داده شده‌اند که سعی می گردد مورد بررسی دقیق‌تری قرار گیرند. انتخاب وضعیت ترکیب بار و نوع تنش بکار رفته، به نحو قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد بتن تاثیر گذار خواهد بود.

۴-۱- تأثیر تنش فشاری در ترکیب بار

اعمال بار فشاری بر آزمونه‌های بتنی در آزمایشگاه نسبتا آسان است. با این حال، تحقیقات کمی در زمینه ترکیب تنش فشاری و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن انجام گرفته است. این مسئله را می‌توان چنین توجیه نمود که به دلیل بسته شدن ترک ها، ظاهرا مقاومت بتن افزایش می‌یابد. هرچند، در حالتی که تنش فشاری بیش از حدود ۸۵٪ مقاومت فشاری بتن باشد، تشکیل ریز ترک ها دارای اثر مهمتری بوده و نهایتا به افزایش نفوذ آب و خرابی بیشتر منجر می‌شود [۴۱].

گونچارف و ایوانف [۴۲] تاثیر تنش فشاری بر دوام یخ زدن وآب شدن بتن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ابتدا بار خارجی و سپس سیکل‌های یخ زدن وآب شدن را اعمال نمودند و نتیجه‌گیری کردند که در تنش‌های کمتر از یک مقدار بحرانی، مقاومت یخ زدن وآب شدن حدودا دو برابر می‌شود. اما در سطح تنش بالاتر، مقاومت به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد.

کنگ و همکاران [۲۱] اثر هم‌زمان تنش فشاری دائمی و سیکل های یخ زدن وآب شدن بر رفتار آزمونه‌های استوانه‌ای بتنی محصور شده توسط FRP[1] را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور از یک قاب فلزی مخصوص مطابق شکل (۲ الف) استفاده گردید. نتایج آن‌ها نشان داده است که پس از ۳۰۰ سیکل یخ زدن وآب شدن همراه با بار فشاری مداوم، یک کاهش ملایم در حدود ۱۲٪ در مقاومت فشاری اتفاق افتاده است. این در حالی بود که آزمونه‌های بدون بار- شامل آزمونه‌های ساده و آزمونه‌های پیچیده شده در FRP – همگی پس از ۳۰۰ سیکل کاملا تخریب شدند. علاوه بر این، بار خارجی سبب تغییر در منحنی تنش- کرنش آزمونه‌های محصور گردید و سبب شد نقطه انتقال در میزان بار بزرگ‌تری رخ دهد.

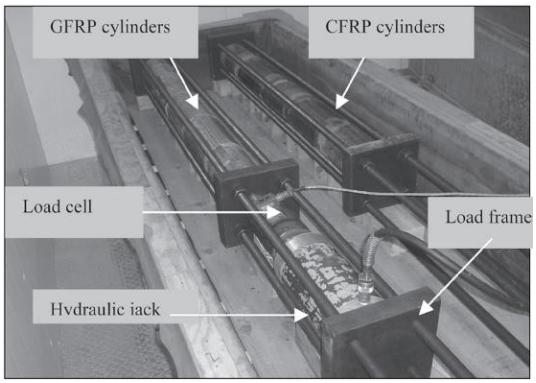
گرین و همکاران [۲۲] در آزمایشات مشابهی بر روی آزمونه‌های استوانه‌ای پیچیده شده در پوشش‌های CFRP[2] و GFRP[3]، تحت اثرات ترکیبی به‌ترتیب کاهش‌های ۲٪ و ۹٪ در مقاومت را گزارش نمودند.

در تحقیق دیگری توسط چن و همکاران [۲۴، ۲۳] ، آزمونه‌های بتنی در یک قاب طراحی شده مطابق شکل (۲ ب) تحت اثرات هم‌زمان تنش فشاری و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن قرار گرفتند. مقاومت باقیمانده بعد از هر سیکل توسط آزمایشات غیرمخرب ارزیابی گردید. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش سرعت خرابی با افزایش سطح تنش و نسبت آب به سیمان بود (شکل ۳). هوای عمدی در بتن سرعت خرابی را کاهش داد، هرچند مقاومت فشاری نیز دچار کاهش گردید.

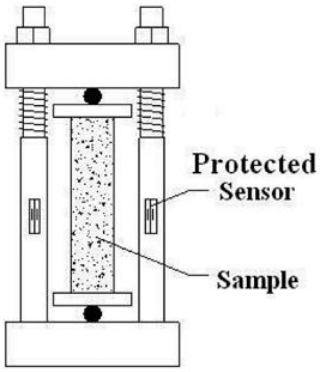
۴-۲- تأثیر تنش کششی در ترکیب بار

آزمایشات کشش مستقیم به تجهیزات دقیقتر با کنترل بیشتری نیاز دارند، لذا تحقیقات محدودی در این زمینه انجام گرفته است.

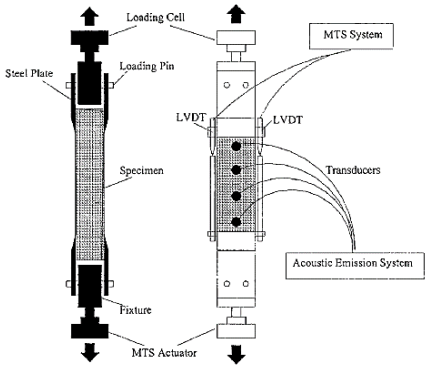
[1] Fiber Reinforced Polymer
[2] Carbon Fiber Reinforced Polymer
[3] Glass Fiber Reinforced Polymer



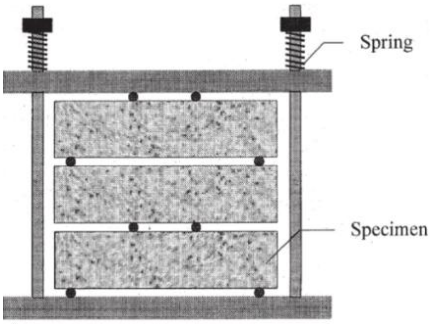
(الف)ترکیب بار فشاری-سیکل‌های یخ زدن وآب شدن [۲۱]



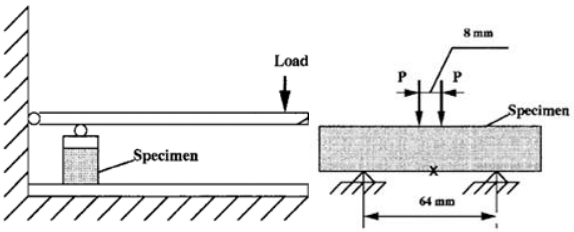
(ب)ترکیب بار فشاری-سیکل‌های یخ زدن وآب شدن [۲۴، ۲۳]



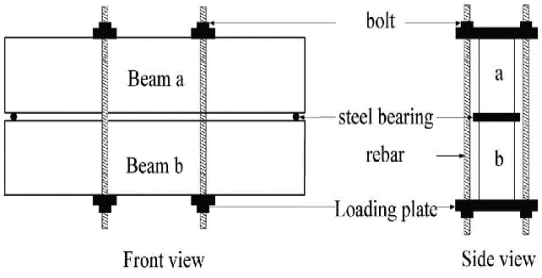
(پ) کشش بعد از سیکل‌های یخ زدن وآب شدن [۲۵، ۱۸]



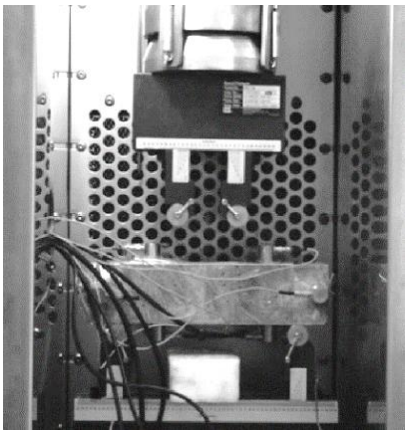
(ت) اثرات همزمان بار ، سیکل‌های یخ زدن وآب شدن [۲۹، ۲۸]
و ترکیب آنها با نفوذ کلراید [۳۴-۳۲]



(ث) ترکیب بار- سیکل‌های یخ زدن وآب شدن بر ملات [۲۷]



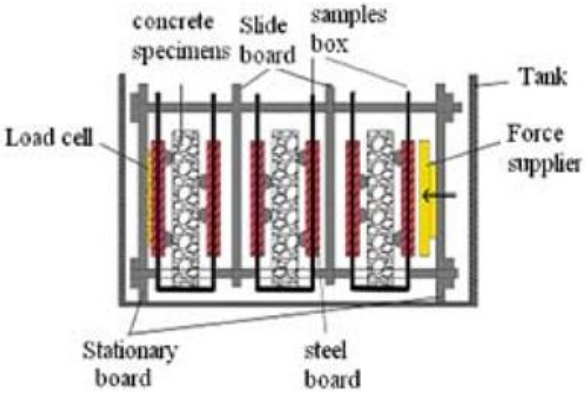
(ج) ترکیب بار، سیکل‌های یخ زدن وآب شدن، کلراید و سولفات [۳۷]



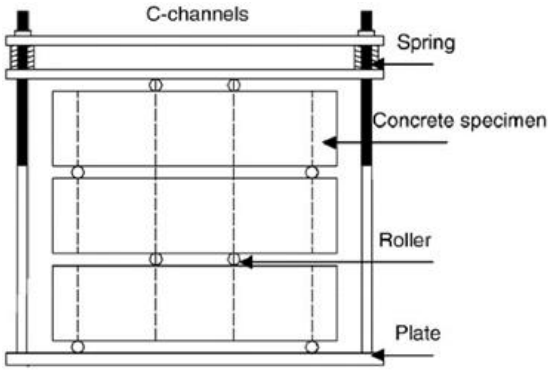
(چ) اثر بار خستگی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن[۱۶،۱۷،۳۱]

(ح) بتن مسلح با میلگرد FRP تحت خمش و سیکل یخ زدن وآب شدن [۳۹]

شکل ۲- برخی از تکنیک‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعه دوام ترکیبی

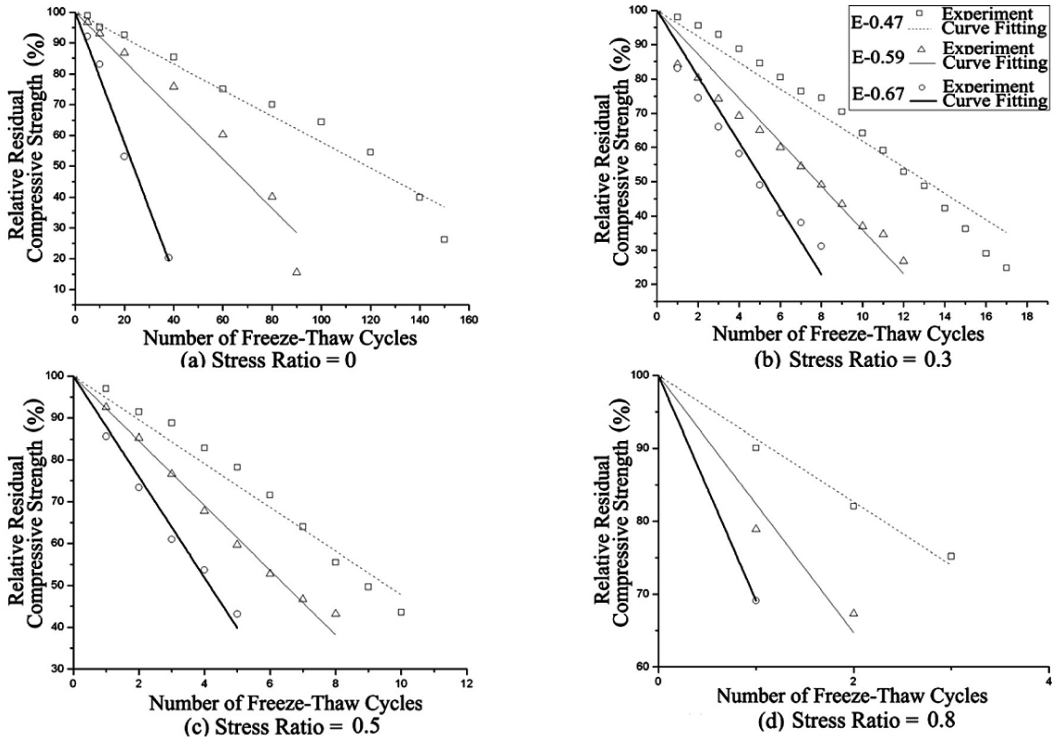


(د) ترکیب بار خمشی و اثرات محیطی [۴۰]



(خ) اثر همزمان بار ، سیکل‌های یخ زدن وآب شدن و نفوذ سولفات [۳۶]

ادامه شکل ۲- برخی از تکنیک‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای مطالعه ترکیب بار و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن



شکل (۳)- مقاومت فشاری نسبی باقیمانده در سیکل های مختلف یخ زدن وآب شدن برای سطوح مختلف تنش [۲۳]

تاثیر ترکیب متوالی تنش کششی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن بر انتقال آب در بتن توسط یانگ و همکاران [۲۵، ۱۸] مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۲ پ) ملاحظه می‌شود، آن‌ها برای اعمال بار کششی مستقیم از صفحات فلزی که توسط چسب اپوکسی به سطح بتن چسبیده بود استفاده نمودند. طبق نتایج آن‌ها، تنش کششی در محدوده ٪۹۰-۶۰ مقاومت کششی دارای تاثیر کمی بر جذب آب می‌باشد. (شکل ۴) مطالعات ریز ساختاری آن‌ها نشان داد ریز ترک‌ها تا سطح تنش ۰/۹ دارای اتصال زیادی با یکدیگر نیستند. در مطالعه آزمایشگاهی دیگری توسط ساهماران و لی [۲۶] ، تیرهای ساخته شده از کامپوزیت سیمانی مهندسی[1] پس از ترک خوردگی در معرض سیکل‌های یخ زدن وآب شدن در حضور نمک‌های یخ‌زدا قرار گرفته بود. نتایج نشان دادند تیرهای قرار گرفته تحت اثر کرنش تا میزان ۲٪ حتی پس از ۵۰ سیکل، تقریبا تمامی سختی خود را در کشش مستقیم مجدد باز یافته بودند.

[1] Engineered Cementitious Composites (ECC)

۴-۳- تأثیر تنش خمشی در ترکیب بار

تنش حاصل از خمش، یک تنش متداول در سازه‌های بتنی بوده و اعمال آن بر آزمونه در آزمایشگاه نسبتا آسان است. به این دلیل تحقیقات بیشتری در زمینه ترکیب آن با سیکل‌های یخ زدن وآب شدن- در مقایسه با سایر انواع تنش- انجام شده است.

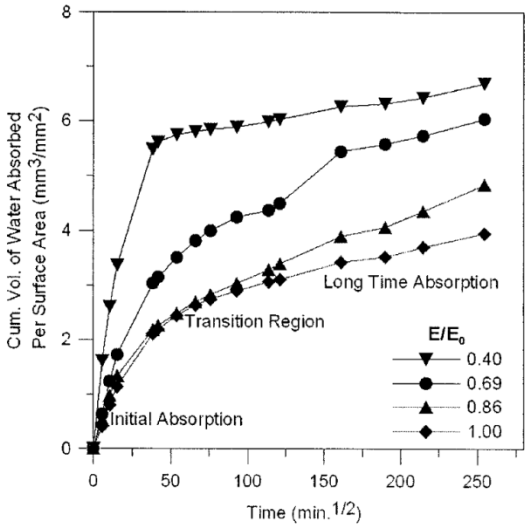
ترکیب همزمان بار خمشی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن بر روی آزمونه‌های ملات توسط ژو و همکاران [۲۷] مطالعه گردید. نحوه اعمال بار در شکل (۲ ث) آورده شده است. در سطح تنش صفر تا ٪۵۰ مدول گسیختگی آزمونه ها، سه مکانیزم تخریبی مشاهده گردید:

(۱) ریز ترک های همگن و یکنواخت،

(۲) رشد یک ترک بحرانی،

(۳) پوسته شدن سطحی.

همچنین آن‌ها گزارش کردند که با افزایش سطح تنش اعمال شده، آزمونه‌های ملات تردتر می‌گردند.



شکل ۴- جذب آب در طول زمان برای سطوح مختلف مدول الاستیسیته نسبی دینامیکی [۲۵]

در تحقیق دیگری، سان و همکاران [۲۹، ۲۸] خرابی بتن تحت اثرات همزمان بار خمشی و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن را مورد مطالعه قرار دادند. به منظورکنترل فرایند بارگذاری از لحاظ اطمینان از رخ ندادن رها سازی تنش[1] در طول زمان اعمال سیکل ها، از یک وسیله مخصوص بارگذاری استفاده گردید (شکل ۲ ت). یافته‌های آن‌ها نشان داد که سطح تنش وارده دارای تاثیر مهمی بر رفتار آزمونه بتنی است. افزایش این کمیت سبب افزایش مقدار و نرخ خرابی می‌گردد (شکل ۵).

میشل [۳۰] دوام عناصر بتنی مسلح با FRP تحت اثرات همزمان خمش و سیکل‌های یخ زدن وآب شدن را مورد مطالعه قرار داد. در حالتی که اتصال بوسیله گروت انجام شده بود، اثرات همزمانی بر دوام ناچیز بود. اما درصورت استفاده از رزین اپوکسی در اتصال نوارهای دال، کاهش متوسط ٪۸ در بار نهایی مشاهده شد.

لی و همکاران [۱۷] ، تاثیر همزمان بار خستگی خمشی و سیکل های یخ زدن وآب شدن بسته (بدون تبادل رطوبتی) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد کرنش باقی‌مانده در حالت ترکیب هم‌زمان حدود ٪۳۰ بیشتر از نمونه مرجع بود، در حالی که همین کمیت در نمونه‌های منجمد در طول بارگذاری حدود ٪۱۵ کاهش داشت. این نتیجه آشکارا اثر تشدید کننده همزمانی بار- یخ زدن وآب شدن را نشان می‌دهد. این محققین در تحقیق جدیدتری با استفاده از روش تحلیلی، نقطه بحرانی که در آن خرابی تحت اثرات همزمانی تشدید می‌گردد را مورد بررسی قرار دادند [۳۱].

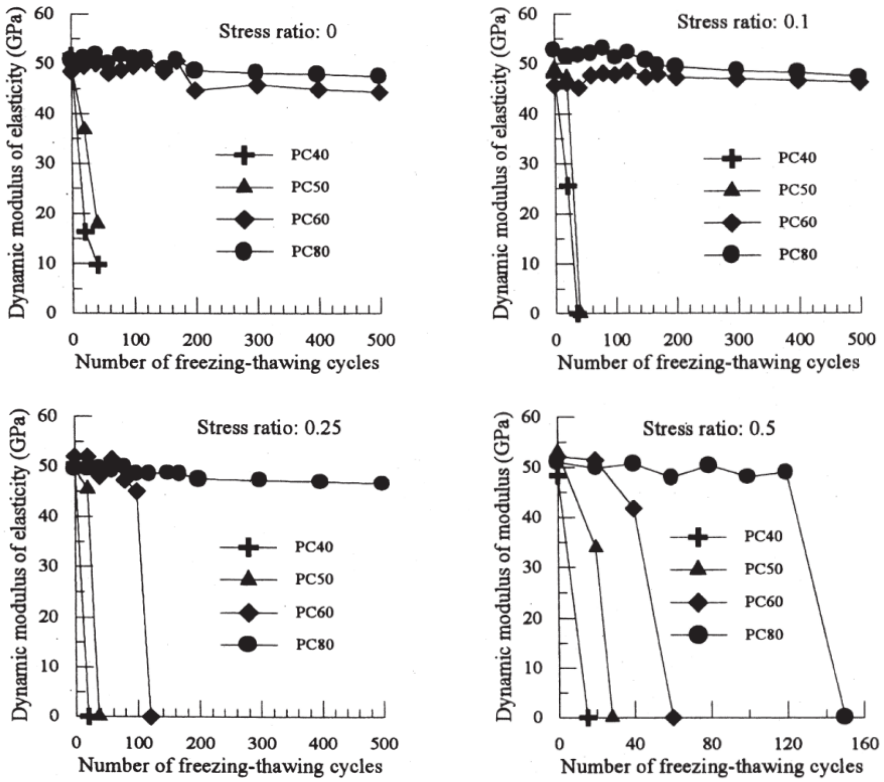
در تحقیق دیگری توسط خیائو و همکاران [۱۶] از تحلیل سیگنال های صوتی[2] برای مطالعه خرابی اثرات ترکیبی استفاده گردید. نتایج آنها نشان داد که شکل‌گیری ترک‌ها در دو مرحله نهفتگی(متناظر با ذوب) و تسریع (متناظر با انجماد) انجام می‌شود. ضمنا تغییرات کرنش ترکیبی با دما به‌صورت متناوب گزارش گردید.

۴-۴- تاثیر تنش خمشی در ترکیب بار در حضور عوامل شیمیایی

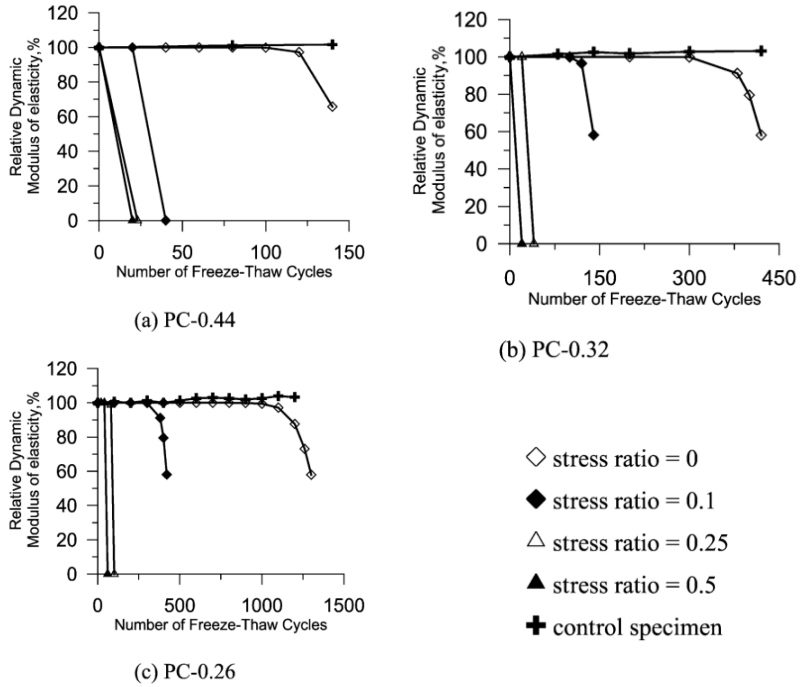
تا کنون مطالعات انجام شده برروی ترکیب دو عامل مورد بررسی قرار گرفت. اما در عمل ممکن است تاثیر همزمانی بار- یخ زدن وآب شدن در سازه‌های بتنی توسط نفوذ عوامل شیمیایی تشدید گردد. در چنین حالتی، ترکیب همزمان سه عامل یا بیشتر اتفاق می‌افتد. در شرایط واقعی، ترکیب همزمان چند عامل کاملا محتمل می باشد. سان و همکاران [۳۳] و مو و همکاران [۳۲،۳۴] مشاهده کردند تخریب بتن تحت اثرات ترکیبی همزمان بار خمشی، سیکل های یخ زدن وآب شدن و نفوذ کلراید با شتاب بیشتری انجام می‌گیرد. افزایش سطح تنش باعث تشدید تخریب می گردد (شکل ۶).

[1] Stress relaxation

[2] Acoustic Emission (AE)



شکل ۵- افت مدول الاستیسیته نسبی دینامیکی تحت اثرات همزمان بار و سیکل های یخ زدن وآب شدن [۲۸]



شکل ۶- افت مدول الاستیسیته نسبی دینامیکی تحت اثرات همزمان بار ، سیکل‌های یخ زدن وآب شدن و نفوذ کلراید [۳۳]

وانگ و همکاران [۳۵] اثر همزمانی تنش خمشی، سیکل‌های یخ زدن وآب شدن و نفوذ کلراید را بر نرخ خوردگی آرماتور مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند تنش ناشی از بار خارجی سبب کاهش زمان لازم برای خوردگی آرماتور شده ودرنهایت ریسک خوردگی در سنین اولیه را بالا می برد. دیائو و همکاران [۳۷،۳۸] افت خواص بتن قرار گرفته در معرض اثرات همزمان بار خمشی،

سیکل‌های یخ زدن وآب شدن و مخلوط سدیم کلراید و سدیم سولفات (به‌منظور شبیه‌سازی اثر آب دریا) را مورد بررسی قرار دادند. طریقه اعمال بار خمشی در شکل (۲ ج) دیده می‌شود. آن‌ها چنین نتیجه‌گیری کردند که اثرات سیکل‌های متناوب یخ زدن وآب شدن و خوردگی ناشی از محلول شیمیایی، مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد و حضور بار دائمی این افت را – متناسب با میزان بار– تشدید می‌کند.

دوام طیف گسترده ای از بتن‌های خود تراکم(SCC[1]) در مقابل ترکیب همزمان حمله سولفاتی، سیکل‌های یخ زدن وآب شدن و بارگذاری خمشی (شکل ۲ خ) توسط بسونی و نهدی [۳۶] مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌های آن‌ها نشان داد که ترکیب سدیم سولفات و تنش خمشی(بخصوص در سطح تنش بالای ۵۰٪) باعث تشدید انتشار ترک‌های ناشی از تنش دائمی در محیط خورنده (اصطلاحا پدیده خوردگی تنش[2]) در ماتریس سیمانی می‌گردد، که در برخی موارد به شکست ناگهانی آزمونه منجر می‌شود. از سوی دیگر، ایجاد ریز ترک‌های ناشی از تنش خمشی دائمی در ناحیه کششی آزمونه موجب افزایش نفوذپذیری سدیم سولفات محلول در آزمونه‌ها گردید. سیکل‌های یخ زدن وآب شدن نیز عاملی جهت شدت گرفتن نرخ خرابی آزمونه ها بود.

۵- بحث و تحلیل

تخریب بتن می‌تواند در اثر عوامل محیطی، مکانیکی و یا ترکیبی از آن‌ها اتفاق بیفتد. در مناطق سردسیر، مهم‌ترین اثرات محیطی ناشی از سیکل‌های یخ زدن و آب شدن و نفوذ عوامل مهاجم شیمیایی می باشند که ممکن است در ترکیب با عوامل مکانیکی تشدید گردد. با مرور بر تحقیقات انجام شده، چنین به نظر می‌رسد که ارزیابی ترک‌های ناشی از بار خارجی دارای نقش تعیین کننده ای است. در ویرایش جدید اغلب آیین نامه‌ها، محدودیت عرض ترک در مواجهه با عوامل محیطی مطرح گردیده است. (جدول ۳)

جدول ۳- محدودیت عرض ترک برای بتن در معرض (الف) سیکل‌های یخ زدن وآب شدن (ب) محیط خورنده

آیین نامه	محدودیت عرض ترک (μm)	
	ب	الف
EN-1992-1-1 (2004)	300~400	--
ACI 318 (2011)	--	--
JSCE (2010)	$(0.035\sim0.005).Cover$	--
(2008) GB/T 50476	150~200	150~200

اما سوال اساسی آن است که با فرض رعایت این محدودیت و عدم توجه به ترک‌های ایجاد شده در اثر عوامل مکانیکی ، تا چه اندازه می‌توان به دوام بتن در مدت عمر سرویس اطمینان داشت. در این زمینه می‌توان به نکات زیر اشاره نمود:

(۱) عرض بحرانی ترک، که بیش از آن نفوذ پذیری بطور ناگهانی افزایش می‌یابد، در تحقیقات گوناگون بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر محاسبه گردیده است. عموما عقیده براین بود که عرض ترک کمتر از این مقدار، تاثیر ناچیزی بر نفوذ پذیری بتن دارد. اما مطالعات جدید با روش‌هایی مانند رادیوگرافی نوترون[3] نشان‌دهنده افزایش قابل ملاحظه مهاجرت[4] یون ها در ریز ترک-های حاصل از اعمال بار از طریق مکش مویینه و تسریع خرابی بتن می‌باشد [۴۳].

(۲) تنها پارامتر مطرح شده مرتبط با ترک در آیین نامه ها، عرض آن می‌باشد. در صورتی که دو پارامتر مهم دیگر، یعنی دانسیته و اتصال پذیری[5] ترک‌ها دارای تأثیرات مهمی بر خواص انتقالی آب و عوامل مهاجم شیمیایی در بتن می‌باشند. مشاهدات SEM[6] نشان می‌دهند با افزایش تعداد سیکل‌های یخ زدن و آب شدن و کاهش مدول دینامیکی نسبی، هر سه پارامتر فوق افزایش می یابند [۱۸].

[1] Self-Compacting Concrete
[2] Stress Corrosion
[3] Neutron radiography
[4] Migration
[5] Connectivity
[6] Scanning Electron Microscopy

(۳) نتایج مطالعات متعدد [۲۵،۴۴،۴۵، ۱۸] نشان دهنده تاثیر ناچیز ترک‌های ناشی از بار مکانیکی بر خواص انتقالی بتن بوده اند. اما مساله مهم، مدت زمان اعمال بار می‌باشد. بارگذاری طولانی مدت – که با پدیده خزش نیز مرتبط می‌باشد- می‌تواند دارای تاثیر جدی بر انتقال آب و عوامل مهاجم شیمیایی در بتن باشد. در این زمینه تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته‌است [۴۶].

(۴) علی رغم وجود محدودیت عرض ترک در برخی از آیین نامه ها، کنترل آن به ویژه در سنین اولیه (در اثر عواملی چون جمع شدگی) بسیار دشوار می باشد. ترک های ناشی از جمع شدگی خصوصا دارای تمایل بیشتری به اتصال با یکدیگر می-باشند [۴۷]. تاکنون روشی برای محاسبه عرض ترک در سنین اولیه پیشنهاد نگردیده است [۴۸].

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، سعی بر این است با مروری بر تحقیقات گذشته و تحلیل ارتباط تشکیل ترک‌های ناشی از بارهای مکانیکی به عنوان عامل اساسی و دوام سازه، شناخت واقعی تری از رفتار سازه های بتنی تحت بار که در مناطق یخبندان مورد استفاده قرار خواهند گرفت ارائه گردد. بر این اساس نتایج ذیل قابل ذکر می باشند:

(۱) در سازه های بتنی قرار گرفته در معرض دو یا چند عامل مخرب ، الزامات کنونی مطرح شده در آیین نامه‌ها نمی‌تواند تضمین کننده عمر سرویس کافی باشند. به منظور کنترل نفوذ عوامل مهاجم از طریق ترک‌های ایجاد شده ناشی از عوامل فیزیکی و مکانیکی، طراحی آزمایشات دوام جدیدی مورد نیاز می‌باشد. پیش بینی می‌شود این تغییرات در آیین نامه‌ها و استانداردهای جدید لحاظ گردند.

(۲) امروزه یکی از مهمترین عناوین تحقیقاتی دوام بتن، اثر ترکیب بارهای مکانیکی (فشاری- کششی و خمشی) و بارهای محیطی بر سازه‌های بتنی است. در طراحی دوام بتن مناطق سردسیر، ترکیب بار مکانیکی، سیکل‌های یخ زدن و آب شدن و نفوذ عوامل مهاجم شیمیایی باید مورد توجه قرار گیرد.

(۳) شواهد کافی درمورد اثر تشدیدکننده‌گی ناشی از ترکیب بارهای مکانیکی و محیطی بر خرابی، افت خواص و کاهش عمر سرویس سازه‌های بتنی در دسترس می‌باشند. بنابراین نیاز مبرمی برای درک بهتر مکانیزم‌های خرابی تحت اثرات ترکیبی بارها احساس می شود.

(۴) اثر همزمان بارها، شبیه سازی بهتری از محیط واقعی سازه بتنی نسبت به اثر متوالی بارها (که آزمایشات آن متداول‌تر است) ارائه می‌کند.

(۵) لازم است نتایج مطالعات آزمایشگاهی با مطالعات درمحل مورد مقایسه قرار گیرند تا میزان مناسب بودن روش و محدوده کاربرد آن مشخص گردد.

(۶) در حال حاضر روش آزمایش استانداردی برای ارزیابی دوام بتن تحت اثرات ترکیبی وجود ندارد. باتوجه به وجود تنش کششی در حالت اعمال بار خمشی و عملی‌تر بودن آزمایشات آن نسبت به کشش مستقیم، ترکیب هم‌زمان سیکل‌های یخ زدن وآب شدن، بار خمشی و نفوذ کلراید به عنوان مناسب‌ترین حالت آزمایش پیشنهاد می‌گردد.

۷- مراجع

[1]. Gehlen, C. and Schiessl, P. “Probability-based durability design for the Western Scheldt tunnel”, Structural Concrete Journal of fib, Vol. P1, No.2, 1-7, 1999.

[2] Song, H.W. “Service life prediction of cracked concrete structures subjected to chloride attack and carbonation.” Proceedings, Conference Service Life of Concrete Structures – Concept and Design, Hokkaido University, 21-30, 2005.

[3] Somnuk T. and Jittbodee K. “Maintenance-free service life design of concrete subjected to carbonation,” Proc. Conf. Service Life of Concrete Structures – Concept and Design, Hokkaido University, 41-52, 2005.

[4] DuraCrete. Probabilistic performance based durability design of concrete structures: General guidelines for durability design and redesign, Report No. BE95-1347/R14, 2000.

[5] Zhao, T., Jiang, J., and Wan, X. “Durability and service life of reinforced concrete structures under combined mechanical and environmental actions.” Proceedings of the International Conference on Concrete Repair Rehabilitation and Retrofitting; Cape Town; Taylor & Francis; 152-153, 2012.

[6] Zhao, T., Wittmann, F., and Ueda, T. (Eds.). Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads, Aedificatio Publishers, Freiburg, 2005.

[7] Wittmann, F.H., Zhang, P., and Zhao, T. Influence of combined environmental loads on

editors. High performance structures and materials, Proceedings No. 2. WIT press; 2004.
[21] Kong A, Fam A, Green MF. In: Carol K. Shield, John P. Busel, Stephanie L. Walkup, Doug D. Gremel, editors. Freeze-thaw behavior of FRP-confined concrete under sustained load. Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures; Kansas City: American Concrete Institute; 705–722, 2005.
[22] Green MF, Bisby LA, Fam AZ, Kodur VKR, "FRP confined concrete columns: behavior under extreme conditions." Cement and Concrete Composites, 28:928–937, 2006.
[23] Chen, S., Song, X., Liu. X., "Model of compressive strength degradation of concrete under both freeze thaw cycles and compressive loads," Sustainable Development of Critical Infrastructure CDRM 8, ASCE, 2014.
[24] Chen, S., Song, X., Liu. X., "Compressive strength degradation and evolution of failure surfaces in compressively preloaded concrete under freeze-thaw cycles," Materials Research Innovations Vol.19, Global Conference on Materials Science and Engineering, CMSE, 2014.
[25] Yang Z, Weiss WJ, Olek J. "Water transport in concrete damaged by tensile loading and freeze-thaw cycling." Journal of Materials in Civil Engineering; 18:424–434, 2006.
[26] Sahmaran, S. and Li, V C, "De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites," Cement and Concrete Research, 37, 1035 – 1046, 2007.
[27] Zhou Y, Cohen MD, Dolch WL. "Effect of external loads on the frost-resistant properties of mortar with and without silica fume." ACI Materials Journal; 91:595–601, 1995.
[28] Sun W, Zhang YM, Yan HD, Mu R. "Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles." Cement and Concrete Research; 29:1519–1523, 1999.
[29] Sun, W. et al, "Damage and its restraint of concrete with different strength grades under double damage factors," Cement & Concrete Composites, 21, 439-442, 1999.
[30] Mitchell PA. Freeze-thaw and sustained load durability of near surface mounted FRP strengthened concrete, Master Thesis, Kingston (Canada): Queen's University; 154–156, 2010.
[31] Li, W `and Sun, W. "Damage of concrete subjected to simultaneous fatigue load and thermal effect," Magazine of Concrete Research, Volume 64 Issue 1, 2012.
durability of reinforced concrete structures, Int. J. Restoration of Buildings and Monuments, 12, 2006.
[8] Mehta PK, Burrows WR. Building durable structures in the 21st century. Concrete International; 23:57–63, 2001.
[9] Neville A. "Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future." Materials and Structures; 34:114–118, 2001.
[10] Schneider U, Nagele E, Ducat F. "Stress corrosion initiated cracking of concrete." Cement and Concrete Research. 16:535–544, 1986.
[11] Huang P, Bao Y, Yao Y. "Damages of reinforced concrete under synergistic effects of cyclic freeze-thaw, deicing-salt attack, rebar corrosion and bending load." Industrial Construction; 35: 63–67, 2005. (In Chinese).
[12] Hasan M, Ueda T, Sato Y. "Stress-strain relationship of frost-damaged concrete subjected to fatigue loading." Journal of Materials in Civil Engineering; 20:37–45, 2008.
[13] RILEM Technical Committee TDC; Test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load; China Building Materials Academy; Beijing; China (www.rilem.cn),2011.
[14] Zuquan Jin, Durability and service life prediction of concrete exposed to harsh environment in West of China; Master Thesis, Southeast University; 2006. (In Chinese).
[15] Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM C 666, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-02, 2003.
[16] Qiao, Y Sun, W Jiang J. "Damage process of concrete subjected to coupling fatigue load and freeze/thaw cycles," Construction and Building Materials, Vol. 93,806–811, 2015.
[17] Li W., Sun W., Jiang J.. "Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously." Construction and Building Materials, 25 (3):2604 – 2610, 2011.
[18] Yang, Z., Assessing cumulative damage in concrete and quantifying its influence on life cycle performance modeling. Ph.D. thesis, Purdue Univ., West Lafayette, 2004.
[19] Trottier JF, Forgeron DP. "Cumulative effects of flexural fatigue loading and freezing and thawing cycles on the flexural toughness of fiber reinforced concrete." In: Banthia N, Sakai K, Gj £ rv OE, editors. Concrete under severe conditions, Proceedings No. 3. Canada: Routledge press; 2001.
[20] Forgeron DP, Trottier JF. "Evaluating the effects of simultaneous freezing and thawing and flexural fatigue loading cycles on the fracture properties of FRC." In: De Wilde WP, Brebbia CA,

[32] Mu R, Miao C, Luo X, Sun W. "Interaction between loading, freeze–thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement." Cement and Concrete Research. 32:1061–1066, 2002.
[33] Sun, W., Mu, R., Luo, X., and Miao, C. W. "Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete." Cement Concrete Research, 32, 1859 – 1864, 2002.
[34] Mu, R., Miao, C., Luo, X. and Sun, W. "Combined Deterioration of Concrete Subjected to Loading, Freeze-Thaw Cycles and Chloride Salt Attack." Magazine of Concrete Research. 54: 175-180, 2002.
[35] Wang Z, Yan Y, Wang L. "Corrosion behavior of steel bar embedded in concrete subject to freeze-thaw cycles–chloride attack–flexural load." Journal of Chinese Ceramic Society; 39:130–135, 2011.
[36] Bassuoni MT, Nehdi ML. "Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading." Cement Concrete Research; 39(3):206–26, 2009.
[37] Diao, B., Sun, Y., Cheng, S. H., and Ye, Y. H. "Effect of mixed-corrosion freeze-thaw cycles and persistent loading on the behavior of reinforcement concrete beams." Journal of Cold Regions Engineering, 25(1), 37 –52, 2011.
[38] Diao, B., Zhang, J., Ye, Y., and Cheng, S. "Effects of Freeze-Thaw Cycles and Seawater Corrosion on the Behavior of Reinforced Air-Entrained Concrete Beams with Persistent Loads." Journal of Cold Regions Engineering, 44-53, 2013.
[39] Laoubi K, El-Salakawy E, Benmokrane B. "Creep and durability of sand-coated glass FRP bars in concrete elements under freeze/thaw cycling and sustained loads." Cement and Concrete Composites; 28:869–878, 2006.
[40] Wang L, Yao Y, Wang Z, Huang P, Guan X. "Test method to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load." Proceedings of the International Conference on Concrete Repair Rehabilitation and Retrofitting; Cape Town; Taylor & Francis; 248–249, 2012.
[41] Wittmann, FH, Zhang, P Zhao, T," Interaction of deteriorating processes in cement based materials," 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, 2008.
[42] Goncharov A, Ivanov F. "Frost resistance of concrete of various strengths under compressive loading." Power Technology and Engineering; 3:500–504, 1986.
[43] Yao, Y., Wang, L. and Wittmann, F.H., Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions: An Annotated Bibliography, Aedificatio Publishers, Freiburg,2013.
[44] Meziani, H. and Skoczylas, F. "An experimental study of the mechanical behaviour of a mortar and of its permeability under deviatoric loading." Materials and Structures, 32, 403–409, 1999.
[45] Banthia, N. and Bhargava, A. "Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement." ACI Materials Journal, 104, 70–77, 2007.
[46] Kefei Li, Durability Design of Concrete Structures: Phenomena, Modeling, and Practice, Wiley,2016.
[47] Hearn, H., "Effect of Shrinkage and Load-Induced Cracking on Water Permeability of Concrete", ACI Material Journal, March-April, pp.234-240,1999.
[48] Frangopol D, Sause R, Kusko C, "Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization" Proceedings of the Fifth International IABMAS Conference, Philadelphia, USA, 11-15 July 2010.

An Overview of the New Approach in Frost Durability Evaluation of Concrete Structures

Mahmoud Nili*
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran
Alireza Azarioon
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran
S. Mahdi Hosseinian
Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran

Abstract

Many efforts have been dedicated to assess the service life of the concrete infrastructure such as dams, bridge decks and concrete pavements in cold regions. However, no correlations were obtained between the real structures performance and the laboratory results. These differences originate mainly from the fact that the loading conditions and existing stresses were not considered in the test methods and subsequently, reliable results were not obtained from the experiments. Recently, the concrete structures design methods tended to create a model based on the "concrete performance" instead of the conventional ones. However, no sufficient reliable laboratory results are available for real assessment, and there is an urgent need to develop performance-based tests consists of two or more combined deterioration mechanisms.In the present paper, an overview of existing test methods and a selection of the most important combinations of coupled mechanical loads and environmental actions in cold climates is provided. This contribution may help the engineers to have a clear vision about the real behavior of the structure, in the cold regions, which should suffer both freeze thaw cycles and different types of loadings.

Keywords: Freeze- thaw Cycles, Durability, Service Life. Combined Actions, Synergetic Effects.

* Corresponding Author: nili36@yahoo.co.uk