

## Estimation of the Permeability of GFRP Sheet Reinforced Concrete, Under Extreme Environments, Using "Cylindrical Chamber" Method

Mahmood Naderi<sup>1\*</sup>, Roza Rahbari<sup>2</sup>, Mohammad Mahdi Shahmohammadi<sup>3</sup>

1- Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

2- Ph.D. Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

3- MSc in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

### ABSTRACT

Nowadays, the glass fiber-reinforced polymer (GFRP) sheets have been known to be one of the most effective composite materials that are used to increase the strength and durability of concrete structures. Owing to the light weight, corrosion resistance, high tensile strength and the ease of application without any interruption of the services, the use of these sheets has become very wide spread. In recent years, some organizations in Iran have opted for the use of GFRP sheets for the strengthening and protection of their concrete structures that are located in the areas exposed to the Persian Gulf water. Therefore, in the present paper, the results of the permeability tests conducted on GFRP strengthened concrete samples, using the newly developed "Cylindrical chamber" method are discussed. Since the deterioration of concrete structures exposed to extreme environmental conditions due to the water penetration, appears to be a critical issue, the above mentioned samples have been exposed to different cycles of wet-dry, high and low temperatures and freeze-thaw tests, before measuring their permeability's. The results showed that the temperature change cycles have a small effect on the permeability of GFRP in comparison to the freeze-thaw and wet-dry cycles. The penetrated volume of water after 30, 90, 150 wet-dry cycles, was 61%, 100%, 18% lower than the respective values obtained after the same cycles of temperature changes. Considering the freeze-thaw conditions it was found that similar cycles of freeze-thaw tend to increase the permeability of the samples by about 12%, 36%, 29%, compared with the respective values of the temperature change conditions.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 July 2019

**Revise Date:** 28 February 2020

**Accept Date:** 07 March 2020

### Keywords:

Permeability;

GFRP;

Cylindrical chamber;

Freeze-thaw;

Wet-dry;

Temperature changes

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.195360.1912

\*Corresponding author: Mahmood Naderi

Email address: profmahmoondnaderi@eng.ikiu.ac.ir

## تخمین نفوذپذیری ورق های GFRP تقویت کننده بتن، تحت شرایط محیطی حاد به روش "محفظه استوانه ای"

محمود نادری<sup>۱\*</sup>، رزا رهبری<sup>۲</sup>، محمد مهدی شاه محمدی<sup>۳</sup>

۱- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### چکیده

امروزه ورق های کامپوزیتی *GFRP* به عنوان یکی از مؤثرین مواد کامپوزیتی شناخته شده است، که به منظور تعمیر، تقویت و افزایش ظرفیت باربری سازه های بتنی مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی، استحکام کششی بالا و سهولت استفاده بدون ایجاد وقفه در کاربری سازه، استفاده از این ورق ها بسیار گسترده شده است. در سال های اخیر، برخی سازمان ها در ایران برای مقاوم سازی و محافظت از سازه های بتنی خود که در مناطق حاشیه خلیج فارس قرار دارند، استفاده از ورق های *GFRP* را انتخاب نموده اند. از این رو در مقاله حاضر، نتایج آزمایش نفوذپذیری انجام شده بر نمونه های تقویت شده با *GFRP* با استفاده از روش تازه توسعه یافته "محفظه استوانه ای" مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه زوال سازه های بتنی ناشی از نفوذ آب که در معرض شرایط حاد محیطی قرار دارند، مسئله ای مهم می باشد، پیش از اندازه گیری نفوذپذیری، نمونه های اشاره شده در بالا، تحت چرخه های مختلف تر و خشک، دمای بالا و پایین و یخ و ذوب یخ قرار می گیرند. نتایج حاصله بیانگر آنست که چرخه های تغییرات دما تاثیر اندک و چرخه های یخ و ذوب یخ، و تر و خشک شدن تاثیر بیشتری بر نفوذپذیری *GFRP* داشته است. میزان آب نفوذ یافته پس از ۳۰، ۹۰، ۱۵۰ سیکل در شرایط تر و خشک به ترتیب ۶۱٪، ۱۰۰٪، ۱۸٪ بیشتر از مقادیر بدست آمده از شرایط تغییر دما می باشد. با توجه به شرایط یخ و ذوب یخ نیز، تمایل به افزایش نفوذپذیری نمونه ها در سیکل های مشابه یخ و ذوب یخ به ترتیب در حدود ۱۲٪، ۳۶٪ و ۲۹٪ نسبت به شرایط تغییر دما مشاهده شد.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، *GFRP*، محفظه استوانه ای، یخ و ذوب یخ، تر و خشک شدن، دماهای متغیر

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2020.195360.1912	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.195360.1912	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۰۹	۱۳۹۸/۰۵/۰۵
			محمود نادری		*نویسنده مسئول:	
			profm Mahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از مصالح نوین در ساخت سازه‌ها به منظور سبک‌سازی، افزایش کارایی و سرعت اجرا بسیار متداول شده است. در بین مقاطع مرکب، استفاده از مقاطع کامپوزیت بتن-پلیمری در سازه‌ی پل‌ها، اسکله‌ها و ساختمان‌های بلند مرتبه، مزایای قابل توجهی دارد [۱]. از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون در سراسر دنیا سیستم‌های FRP (پلیمرهای مسلح به الیاف) به صورت پوشش‌های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. اگرچه اطلاعات زیادی در زمینه‌ی عملکرد اعضای تقویت شده با ورق‌های FRP و رفتار کوتاه مدت آن‌ها در دست است، اما درباره‌ی رفتار دراز مدت و دوام آن‌ها در تماس با عوامل محیطی مخرب اطلاعات چندانی در دست نمی‌باشد. اکثر سیستم‌های FRP پس از قرار گرفتن در معرض عوامل محیطی از جمله دماهای بالا و پایین، رطوبت، یخ و ذوب یخ و شرایط شیمیایی، خصوصیات مکانیکی کاهش یافته‌ای را نشان می‌دهند. شرایط محیطی، نوع رزین و مواد تشکیل دهنده آن، مدت زمان قرارگیری در شرایط نامطلوب، نوع الیاف و روش‌های اجرایی رزین از جمله عوامل موثر در این مساله می‌باشند. آیین‌نامه‌ی انجمن بتن آمریکا، به منظور در نظر گرفتن تاثیر عوامل مخرب محیطی بر عملکرد ورق‌های FRP، ضرایب کاهش را برای کرنش و مقاومت کششی در نظر گرفته است. این در حالیست که دسته بندی محیط‌های مخرب در این آیین‌نامه بسیار کلی است و به اذعان خود، ضرایب کاهش ارائه شده محافظه کارانه بوده و نیاز به تحقیقات گسترده‌تری دارد [۳]. از جمله مکانیزیم‌هایی که دوام لایه‌های مرکب یاد شده را تحت تاثیر قرار می‌دهند، می‌توان به تغییرات شیمیایی یا فیزیکی الیاف، کاهش مقاومت الیاف و از دست رفتن چسبندگی اشاره نمود [۴]. مهم‌ترین شاخصی که به وسیله آن دوام یک سازه بتنی ارزیابی می‌شود، نفوذپذیری آن است. ضمن اینکه آب به عنوان عاملی برای نفوذ عوامل مخرب به بتن عمل می‌کند و از عمر بهره‌دهی آن می‌کاهد [۵].

نفوذپذیری به صورت حرکت سیال (مایع یا گاز) در محیط متخلخل بتن تحت فشار اعمالی تعریف می‌شود. طبق تعریف انجمن بتن آمریکا، نفوذپذیری توانایی بتن برای عبور مواد مایع و گاز از درون خود می‌باشد [۶]. روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. روش مستقیم خود به دو صورت دبی ثابت و عمق نفوذ انجام می‌شود. بر اساس روش دبی ثابت، فشار اعمالی از یک سطح نمونه به آن اعمال شده و این عمل تا رسیدن به یک دبی ثابت و اندازه‌گیری آن در سطح دیگر نمونه ادامه می‌یابد. در این حالت گرادیان فشار ثابت است. در روش عمق نفوذ، دبی جریان در اثر فشار اعمالی ثابت نبوده و از طریق اندازه‌گیری عمق نفوذ، نفوذپذیری نمونه ارزیابی می‌شود. به دلیل ریزساختار متراکم بتن، ممکن است چند هفته نیاز باشد تا دبی با مقدار ثابت در نمونه بتنی حاصل شود. بنابراین به دلیل زمان کمتر آزمایش با استفاده از روش عمق نفوذ، این روش برای ارزیابی نفوذپذیری بتن ترجیح داده می‌شود. ضمن اینکه به دلیل زمان زیاد انجام آزمایش با استفاده از روش جریان ثابت و پیشرفت هیدراسیون، امکان تغییر ساختار داخلی نمونه بتنی وجود دارد. در روش غیر مستقیم نیز همان‌طور که از نام این روش پیداست، نفوذپذیری نمونه به طریق مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود. روش‌های پالس فشار ناپایدار و پرومکانیکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری نفوذپذیری می‌باشند. اساس روش پالس فشار ناپایدار بر اساس اندازه‌گیری فشار به جای اندازه‌گیری دبی در زمان‌های مختلف استوار است. در روش‌های پرومکانیکی تاریخچه کرنش-زمان تحت گرما یا فشار اعمالی را که به حرکت سیال در شبکه منافذ بستگی دارد، اندازه‌گیری می‌کنند [۷].

## ۲- تحقیقات انجام شده

در طراحی سازه‌های بتنی مانند مخازن بتنی نگهداری مایعات، علاوه بر مقاومت کافی، دوام نیز باید مدنظر طراحان قرار گیرد. به عبارت دیگر، سازه بتنی باید به گونه‌ای طراحی گردد که هم از مقاومت مطلوبی برخوردار باشد و هم نفوذپذیری کمی داشته باشد. لزوم به دانستن نفوذپذیری سازه‌های بتنی از اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی گسترش یافت. طراحان سدها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی که در معرض فشارهای هیدرولیکی بالایی بودند، نیاز به دانستن دبی نفوذ آب را در چنین سازه‌هایی داشتند. نفوذپذیری مهم‌ترین مشخصه‌ای است که رفتار بلندمدت سازه بتنی را مشخص می‌کند [۸]. تحقیقات بسیاری در زمینه عوامل مؤثر بر نفوذپذیری بتن انجام گرفته است. از جمله این عوامل می‌توان به نسبت آب به سیمان [۹]، مقدار سنگدانه‌ها [۱۰]، اندازه سنگدانه‌ها [۱۱]، مشخصات ریزساختاری [۱۲]، تاثیر افزودنی‌ها

[۱۳] اشاره نمود. مشاهده می شود که تغییر در نسبت های اختلاط به شدت بر میزان نفوذپذیری نمونه بتنی تأثیرگذار است. در ادامه به برخی مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی عوامل مؤثر در دوام و عملکرد ورق های FRP اشاره شده است.

خواص انواع کامپوزیت ها از قبیل الیاف کربن، شیشه و آرامید که به مدت ۲۰ روز در آب با دمای ۲۳+ و ۷۰+ درجه سانتی گراد مستغرق بودند توسط گوپالان [۱۴] و همکاران، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که آب در بین سطح مشترک الیاف و رزین و در فضاهای خالی نفوذ می نماید. دوام مواد کامپوزیتی تحت شرایط محیطی مختلف توسط بانک و همکاران [۱۵] بررسی گردید. در مطالعه ذکر شده اثرات حرارت، رطوبت و ترکیبات شیمیایی نیز در نظر گرفته شد که موجب کاهش چشم گیر عملکرد مواد کامپوزیتی گردید. تخمین ثابت های تورم ناشی از رطوبت و بررسی تاثیرات رطوبت بر لایه های FRP توسط بوادی و همکاران [۱۶] صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان داد در دمای ۸۰+ درجه سانتی گراد تنش های ناشی از رطوبت بیشتر از تنش های ناشی از حرارت است. عملکرد لایه های FRP در دمای پایین توسط کاسن و شی [۱۷] مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که الیاف کربن و شیشه در دمای پایین به نسبت الیاف های دیگر، مصالح مناسب تری می باشند. به منظور بررسی دوام ستون های دورپیچ شده با کامپوزیت مطالعات گسترده ای توسط هاوکینز و همکاران [۱۸] صورت پذیرفت. در مطالعه انجام شده توسط گومز و همکاران [۱۹] بر روی دو نوع سیستم تقویت کننده GFRP مقاومت خمشی نمونه ها پس از قرار گرفتن تحت سیکل های یخ و ذوب بررسی گردید. نمونه های تقویت شده با GFRP در آبی که دارای ۲٪ سدیم کلرید بود قرار گرفتند و تحت سیکل های یخ و ذوب یخ در دمای ۴/۴+ و ۸/۸- درجه سانتی گراد خواص نمونه ها از جمله مقاومت خمشی آنها به دقت ارزیابی گردید. نتایج حاکی از آن بود که تحت این شرایط کاهش خواص کامپوزیت ها به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. در مطالعه آزمایشگاهی کورچی و توتانچی [۲۰] مقاومت کششی نمونه های استوانه ای که با سه نوع مختلف الیاف FRP به صورت دورپیچ تقویت شده بودند تحت شرایط مختلف محیطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد کاهش مقاومت در سیستم های CFRP تحت شرایط فوق کمتر از سیستم GFRP می باشد. در مطالعه عددی انجام شده توسط نور یزدانی [۲۱] تاثیر FRP در کاهش نفوذ آب به درون بتن بررسی گردید. در این مطالعه به منظور بررسی حرکت آب در FRP و بتن از تحلیل المان محدود با نرم افزار ANSYS استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد که استفاده از ورق FRP در کاهش نفوذ آب به بتن بسیار مؤثر می باشد. هم چنین مشاهده شد که نفوذ آب در نزدیکی سطح آزاد بتن در محل تکیه گاه ها بیشتر می باشد.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- مصالح بکار گرفته شده

در این تحقیق، نفوذپذیری نمونه های بتنی مقاوم شده با ورق GFRP مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ساخت نمونه های بتنی سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه آبیگ قزوین با وزن مخصوص  $1500 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  می باشد. طرح اختلاط نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده است. درشت دانه شکسته مطابق با استاندارد ASTM-C33 [۲۲] با حداکثر دانه ۲۰ میلی متر و چگالی  $2450 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، وزن مخصوص  $1690 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  و درصد جذب آب ۰/۶ و ریزدانه با مدول نرمی ۲/۹، چگالی  $2450 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  و درصد جذب آب ۰/۹ استفاده گردید. شن و ماسه مصرفی محصول معدن قدس ۱ واقع در شهریار بوده و قبل از ساخت نمونه ها سنگدانه های مصرف شده شسته و خشک گردیدند. نمونه های ساخته شده، مکعبی با ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلی متر استفاده می باشند. ورق های FRP بکار گرفته شده از نوع الیاف شیشه (GFRP) می باشد که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. برای چسباندن ورق GFRP به سطح نمونه های بتنی از چسب دو جزئی که یک جزء آن رزین و جزء دیگر سخت کننده می باشد استفاده شده است. مشخصات این چسب در جدول ۳ نشان داده شده است. مواد متشکله رزین ها غالباً دارای رنگ های متفاوت می باشند و باید آن قدر مخلوط شوند تا مخلوط به رنگ یکنواخت برسد. عواملی مانند کیفیت مصالح، مهارت نیروی کاری، کیفیت سطح بتن و نوع الیاف در ایجاد یک چسبندگی خوب مؤثر می باشند. هم چنین باید در لبه ها چسبندگی کافی ایجاد شود تا از نفوذ آب جلوگیری گردد [۲۳]. افزایش طول و پهنای نوار الیاف باعث می شود که مقدار باری که باعث گسیختگی بین بتن و الیاف می شود، افزایش یابد [۲۴]. برای نصب سیستم GFRP ورقه های الیاف بدون هر نوع آلودگی، با دست نصب

می شوند و آغشته سازی رزین مطابق با توصیه های سازنده سیستم صورت می گیرد. ضخامت چسب روی سطح بتن باید در حدود ۱ میلی متر باشد.

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه های بتنی

سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )
۴۰۰	۱۵۰	۸۰۰	۱۲۰۰

جدول ۲: مشخصات ورق های دارای الیاف شیشه

مدول الاستیسیته الیاف (MPa)	۷۰۰۰۰
مقاومت نهایی (MPa)	۲۰۰۰
کرنش نهایی	٪ ۲/۵

جدول ۳: مشخصات چسب بکار گرفته شده

زمان گیرش در دمای ۲۱ °C (ساعت)	۱۴
مقاومت کششی (MPa)	۵۵
مدول الاستیسیته ی کششی (MPa)	۲۱۰۰
ضریب پواسون	۰/۳۵

### ۳-۲- شرایط محیطی در نظر گرفته شده

همان طور که در بخش های قبل اشاره گردید، قبل از انجام آزمایش نفوذپذیری نمونه های بتنی تقویت شده با ورق GFRP تحت چرخه های مختلف تغییر دما، تر و خشک و یخ و ذوب یخ قرار داده شدند. به منظور اعمال سیکل تغییرات دمایی، دمای متغیر ۶۰+ تا ۲۰+ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. نمونه های اشاره شده به مدت ۳ ساعت در دمای ۶۰+ درجه و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰+ درجه قرار داده شدند. برای سیکل تر و خشک، نمونه ها پس از عمل آوری اولیه، به درون آب با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انتقال داده و به مدت ۴ ساعت درون آب نگه داشته شدند، سپس برای خشک شدن به مدت ۲ ساعت درون اون با دمای ۶۰+ درجه قرار گرفتند. برای انجام آزمایش های مربوط به چرخه یخ و ذوب یخ، نمونه ها به مدت ۲/۵ ساعت درون فریزر با دمای ۱۷/۵- درجه سانتی گراد قرار گرفتند تا یخ زده و سپس به مدت ۲/۵ ساعت درون آب با دمای ۴/۵+ درجه سانتی گراد خیسانده شده تا فرایند ذوب یخ صورت گیرد.

### ۴- تعیین نفوذپذیری با روش "محفظه استوانه ای"

اندازه گیری نفوذپذیری با روش های مرسوم نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات گوناگون و با حجم بالاست. همچنین به دلیل زمان بردن انجام این آزمایش ها، هزینه انجام آن ها نیز زیاد است. از طرفی اکثر آزمایش های موجود تنها در شرایط آزمایشگاهی قابل اعمال بوده و قابلیت انجام به صورت درجا را ندارند.

در این پژوهش بررسی نفوذپذیری با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه ای" که روشی نوین برای اندازه گیری نفوذپذیری است، انجام شده است. این روش که توسط نادری ابداع شده است [۲۵]، روشی دقیق با کاربری گسترده در تعیین میزان نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمان چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل پروژه است. این دستگاه به نام دستگاه "Cylindrical chamber" یا "محفظه استوانه ای" در دنیا شناخته شده است و قابلیت آزمایش بر روی اتصالات بتنی و ژئوممبران ها با امکان انجام آزمایش قبل و بعد از نصب آن ها را دارد. دستگاه آزمایش "محفظه استوانه ای" در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: اجزای مختلف دستگاه "محفظه استوانه‌ای".

نحوه انجام آزمایش بدین شرح است که در ابتدا سطح بتن کاملاً خشک و تمیز گردیده و در ادامه صفحه فلزی دستگاه که در مرکز آن دارای سوراخ دایره‌ای شکل می‌باشد با چسب به سطح بتن چسبانده می‌شود. جهت جلوگیری از بروز خطا، چسب اضافی از محل اعمال تنش آبی (سوراخ دایره‌ای) جمع می‌گردد. پس از اطمینان از به مقاومت رسیدن چسب، قطعه دیگر دستگاه به صفحه فلزی چسبانده شده به بتن، متصل می‌شود. سپس محفظه دستگاه پر از آب و هواگیری شده و با پیچاندن اهرم دستی، فشار ثابت آب مورد نظر تامین می‌گردد که توسط فشار سنج عقربه‌ای قابل مشاهده است. مقدار نفوذ آب، با رویت میکرومتر عقربه‌ای، در زمان‌های مختلف ثبت می‌گردد [۲۶].

این آزمایش قابلیت انجام روی سطوح افقی (دال ها و عرشه پل) و عمودی (ستون ها) را دارد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

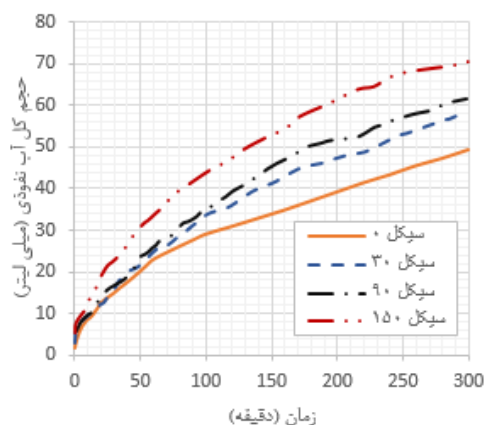
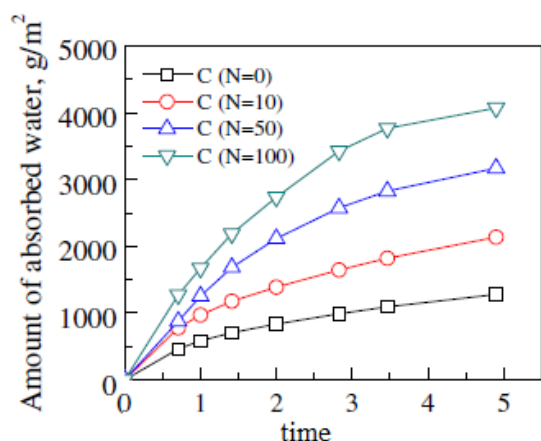
- دستگاه آزمایش بسیار ساده است.
- میزان نفوذپذیری را به صورت کمی ارائه می‌کند.
- دستگاه در عین سادگی دارای دقت بالایی است.
- سرعت انجام آزمایش بالا، هزینه انجام آن ناچیز و قابلیت تکرار آن زیاد است.
- قابلیت حمل آن به سخت‌ترین مکان‌ها میسر است.
- استفاده از این روش نیاز به مهارت و برنامه‌ریزی خاصی برای تکنسین آزمایش ندارد.
- محدودیت ابعادی برای نمونه مورد آزمایش وجود ندارد.
- قابلیت استفاده برای سایر مصالح مانند سنگ، ملات، سفال، آجر فشاری و ... را دارد.
- قابلیت ارزیابی نفوذپذیری سازه در محل را دارد.

روش‌های دیگر ارزیابی دوام بتن مانند RCPT، به دلیل دمای بالای تولید شده و عدم به وجود آمدن جریان پایدار در اثر استفاده از ولتاژ بالا، تغییرات به وجود آمده در مایع منفذی به ویژه در بتن‌های دارای پوزولان در اثر حرارت، تفاوت بالای نتایج به دست آمده و عدم قابلیت استفاده مجدد از نمونه پس از آزمایش دارای محدودیت می‌باشند [۲۷]. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی برای ارزیابی دوام بتن نیز دارای محدودیت‌هایی است. به عنوان مثال، به دلیل اثر پلاریزاسیون و خاصیت خازنی بتن اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از جریان DC برای نمونه‌های بتنی مناسب نمی‌باشد [۲۸].

## ۵- صحت سنجی

در این بخش برای صحت سنجی نتایج نفوذپذیری حاصل از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" حجم آب نفوذی در نمونه بتنی تحت سیکل یخ و ذوب یخ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۲ میزان حجم آب نفوذی در نمونه با افزایش تعداد سیکل یخ و ذوب افزایش یافته است.

به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش "محفظه استوانه‌ای" از مطالعه انجام شده توسط Zhang و همکاران [۲۹] استفاده شده است. در مطالعه Zhang و همکاران مقدار آب جذب شده در نمونه بتنی تحت سیکل‌های یخ و ذوب یخ بدست آورده شده است. در این مطالعه سیکل‌های در نظر گرفته شده ۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سیکل بود، بطوریکه مدت زمان انجام هر سیکل ۲/۵ ساعت و دمای در نظر گرفته شده برای یخ زدن نمونه‌ها  $2 \pm 15^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شد. در شکل ۳ میزان آب نفوذی در نمونه‌های بتنی تحت سیکل‌های مختلف یخ و ذوب یخ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد، میزان آب نفوذ کرده در نمونه‌ها با افزایش سیکل یخ و ذوب یخ افزایش یافته است که مطابقت مناسبی با نتایج بدست آمده از مرجع [۲۹] (شکل ۳) دارد.



شکل ۲: حجم کل نفوذ آب نمونه بتنی تحت سیکل‌های یخ و ذوب یخ با روش "محفظه استوانه‌ای".  
شکل ۳: آب جذب شده تحت سیکل‌های مختلف یخ و ذوب یخ [۲۹].

## ۶- نتایج به دست آمده و تحلیل آن‌ها

در این تحقیق نفوذپذیری نمونه بتنی بدون ورق GFRP و نمونه بتنی تقویت شده با ورق GFRP، با استفاده از آزمایش "محفظه استوانه‌ای" اندازه‌گیری شد. پیش از انجام آزمایش نفوذپذیری، نمونه‌های اشاره شده تحت چرخه‌های تغییر دما، تر و خشک و یخ و ذوب یخ قرار داده شدند. پس از انجام چرخه‌های مختلف و اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌ها، حجم کل و حجم تفاضلی نفوذ آب در سیکل‌های ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ رسم گردید. هدف از رسم نمودار حجم تفاضلی مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب تحت سیکل‌ها و شرایط محیطی مختلف می‌باشد. با گذشت زمان سرعت نفوذ آب در نمونه‌های بتنی کمتر می‌شود، لذا می‌توان فاصله زمانی بین دو قرائت متوالی را افزایش داد. بازه‌های زمانی انتخاب شده برای انجام قرائت‌ها که در جدول ۴ مشاهده می‌شود نیز با توجه به این موضوع انتخاب شده است.

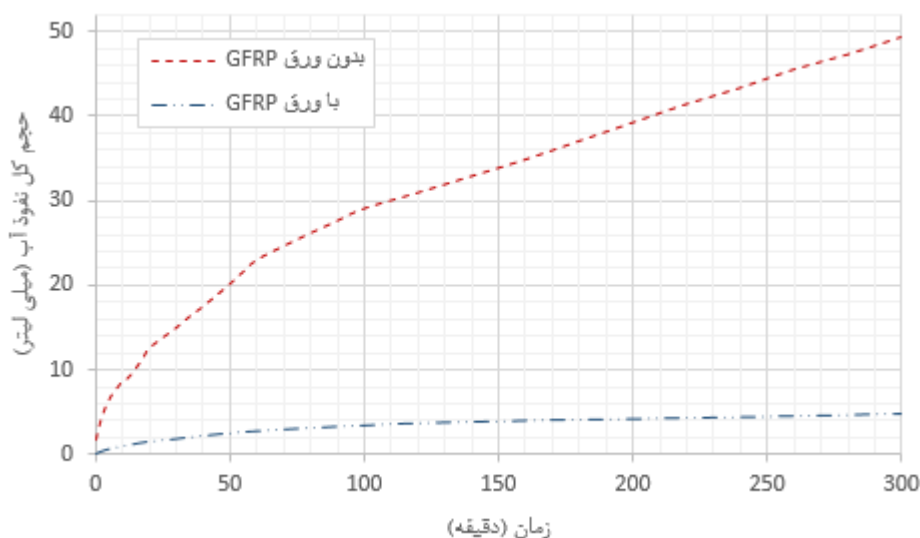
جدول ۴: بازه زمانی قرائت دستگاه

بازه زمانی قرائت دستگاه (دقیقه)	زمان آزمایش (دقیقه)
۰/۵	۱-۰
۲	۲۰-۱
۵	۶۰-۲۰
۱۰	۱۰۰-۶۰
۲۰	۳۰۰-۱۰۰

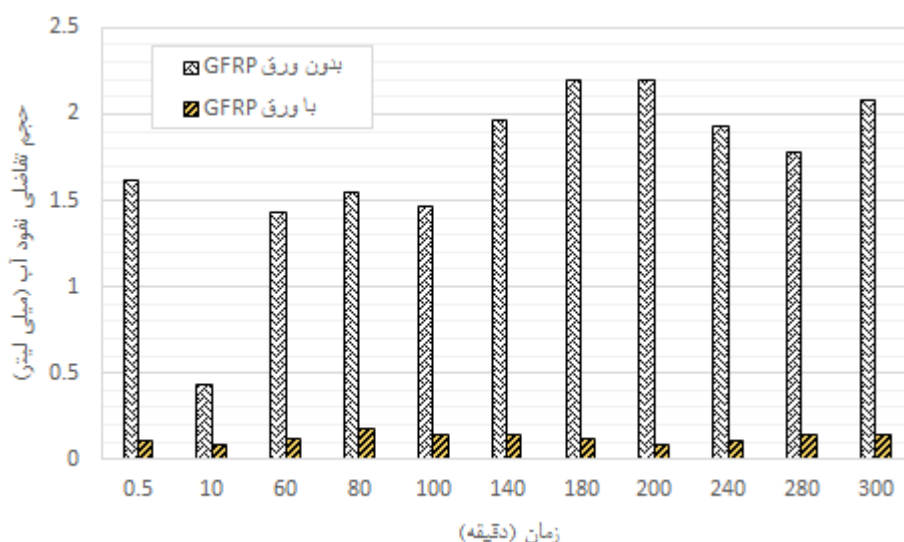
حجم تفاضلی اختلاف حجم نفوذی در هر مرحله از قرائت دستگاه از مرحله قبل آن می‌باشد. بنابراین با توجه به جدول ۴، به عنوان نمونه حجم تفاضلی در زمان ۱۰۰ حجم تفاضلی نفوذ آب بین دقیقه ۹۰ و ۱۰۰ آزمایش می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده، میانگین سه آزمون می‌باشد.

#### ۶-۱- نتایج نفوذپذیری تحت شرایط عادی آزمایشگاهی (نمونه‌های شاهد)

نتایج مربوط به نمونه‌های شاهد، با و بدون ورق GFRP، تحت شرایط نرمال آزمایشگاهی مطابق شکل ۴ و ۵ می‌باشد. همان طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود نفوذ آب در ورق GFRP به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به عبارت دیگر ورق GFRP تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نفوذپذیری نمونه داشته است.



شکل ۴: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه‌های شاهد بر حسب زمان.



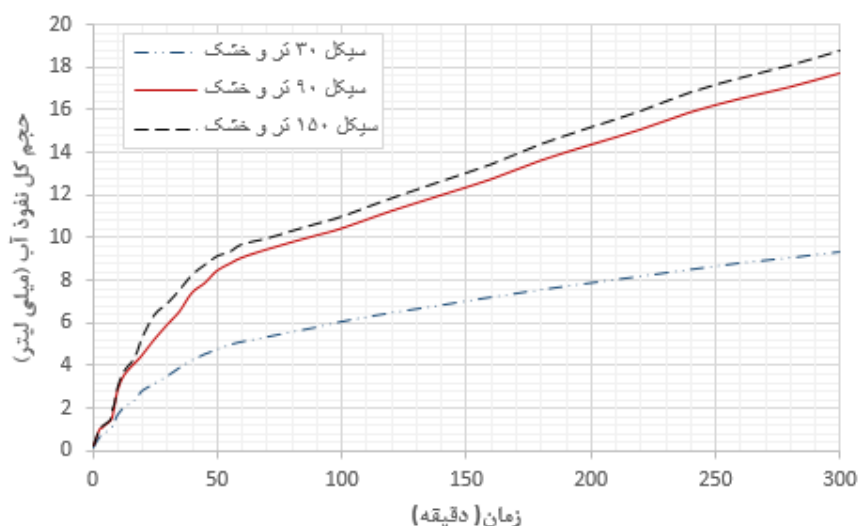
شکل ۵: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه‌های شاهد بر حسب زمان.



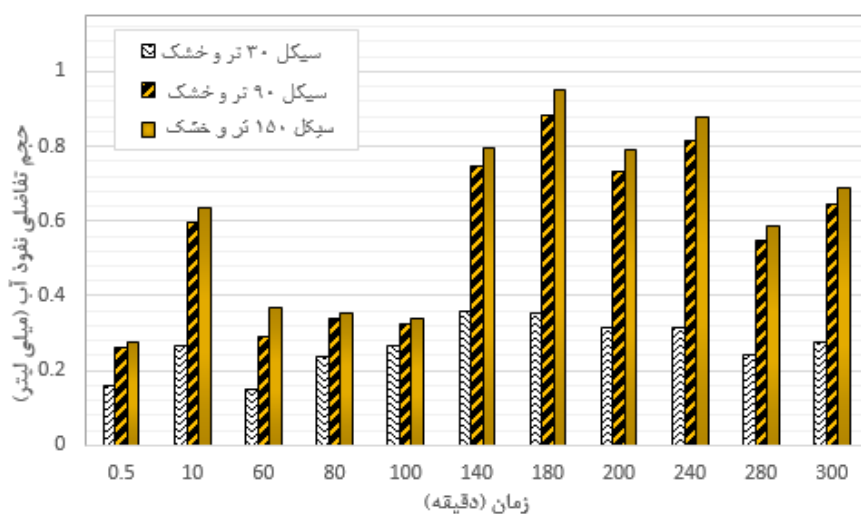
در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که در نمونه بدون GFRP ابتدا شیب بسیار زیاد می‌باشد و به مرور زمان از شیب آن کاسته می‌شود، این به معنای آن است که در ابتدا مقدار نفوذپذیری زیاد و سپس با گذشت زمان کاهش می‌یابد. به طور کلی شیب نمودار نمونه بدون GFRP نسبت به نمونه با GFRP بسیار بیشتر است.

#### ۲-۶- نتایج نفوذپذیری تحت شرایط تر و خشک

سرعت دقیق جذب رطوبت به عواملی هم‌چون میزان خلل و فرج، نوع الیاف، نوع رزین، جهت و ساختار الیاف، درجه حرارت، سطح تنش وارده و حضور ریزترکها بستگی دارد. چنانچه الیاف شیشه به صورت طولانی مدت در کنار آب قرار گیرند آسیب می‌بینند، زیرا حضور آب در سطح الیاف شیشه انرژی سطحی آن‌ها را کاهش می‌دهد و موجب رشد ترک خوردگی می‌گردد. چنین تغییراتی معمولاً برگشت پذیر بوده و به محض خشک شدن کامپوزیت، ممکن است اثر خواص از دست رفته مجدداً جبران شود. در شکل ۶ و ۷ نتایج مربوط به نمونه تقویت شده با ورق GFRP تحت سیکل تر و خشک آورده شده است.



شکل ۶: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه با ورق GFRP تحت سیکل تر و خشک.

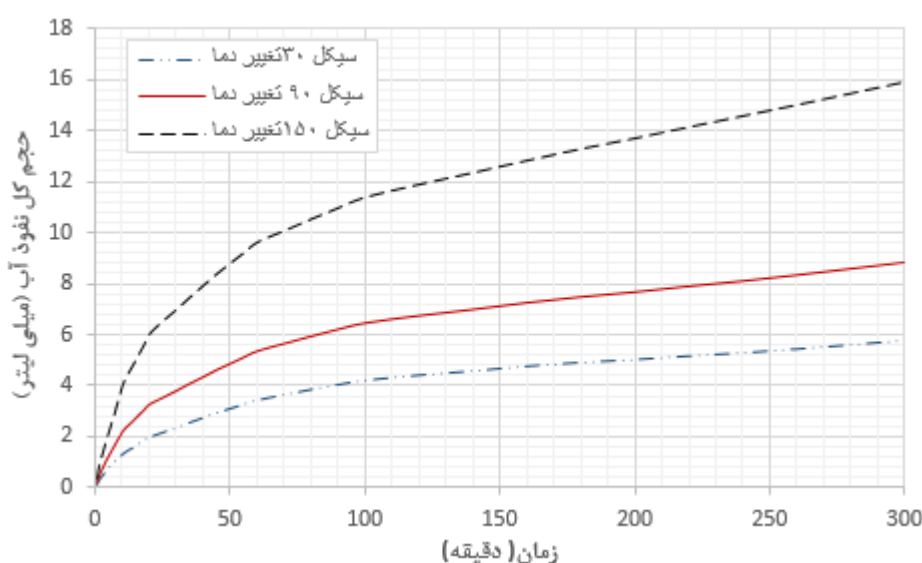


شکل ۷: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه با ورق GFRP تحت سیکل تر و خشک.

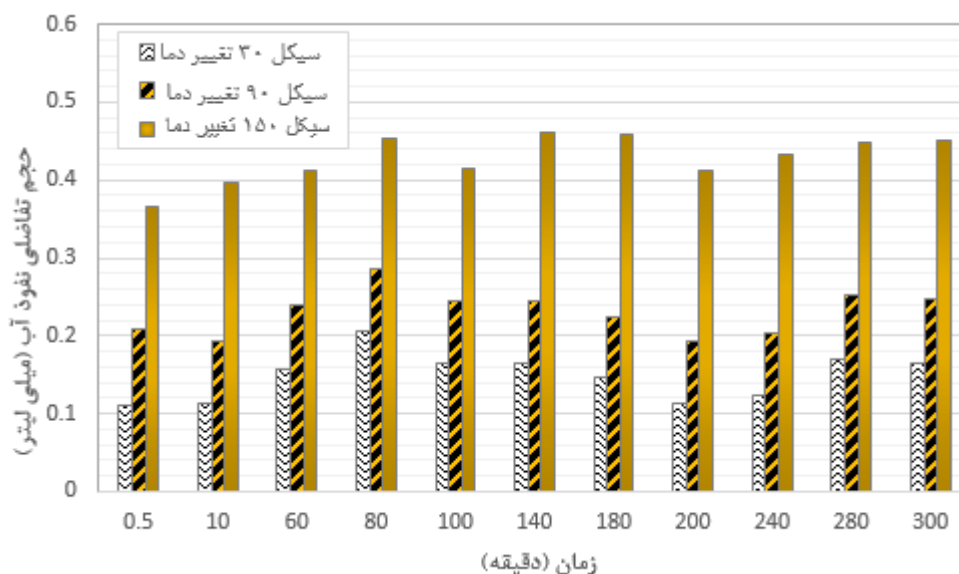
در شکل‌های ۶ و ۷ که مربوط به اعمال سیکل‌های تر و خشک بر روی ورق‌های GFRP می‌باشند، میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش نفوذ مشاهده می‌شود. افزایش پس از اعمال سیکل‌های اولیه نمود بیشتری پیدا می‌کند. در مطالعات آزمایشگاهی انجام شده [۳۰] که به منظور بررسی دوام و عملکرد لایه‌های کامپوزیتی تقویت کننده بتن تحت سیکل تر و خشک صورت گرفت، مشاهده شد که مقاومت این لایه‌ها بخصوص در سیکل‌های اولیه کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت این لایه‌ها منجر به کاهش دوام و افزایش نفوذ آب در آن‌ها می‌گردد. بر اساس گزارشات این مطالعه مقاومت نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP که در معرض شرایط تر و خشک شدگی بودند در مقایسه با نمونه‌های موجود در شرایط نرمال آزمایشگاهی به میزان ۱۷٪ کاهش یافته است.

### ۳-۶- نتایج نفوذ پذیری تحت شرایط تغییر دما

در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج مربوط به نمونه تقویت شده با ورق GFRP تحت سیکل تغییر دما نشان داده شده است.



شکل ۸: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه با ورق GFRP تحت سیکل تغییر دما.

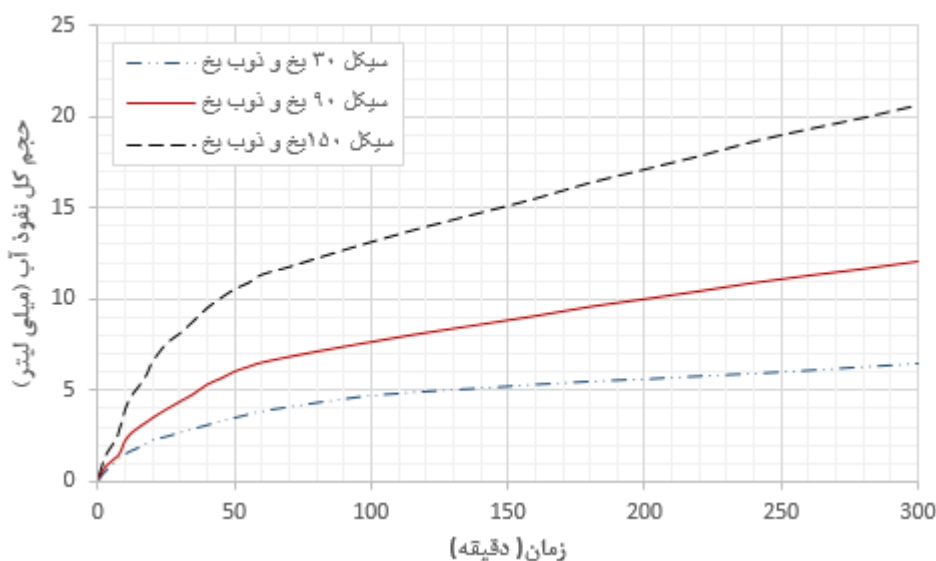


شکل ۹: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه با ورق GFRP تحت سیکل تغییر دما.

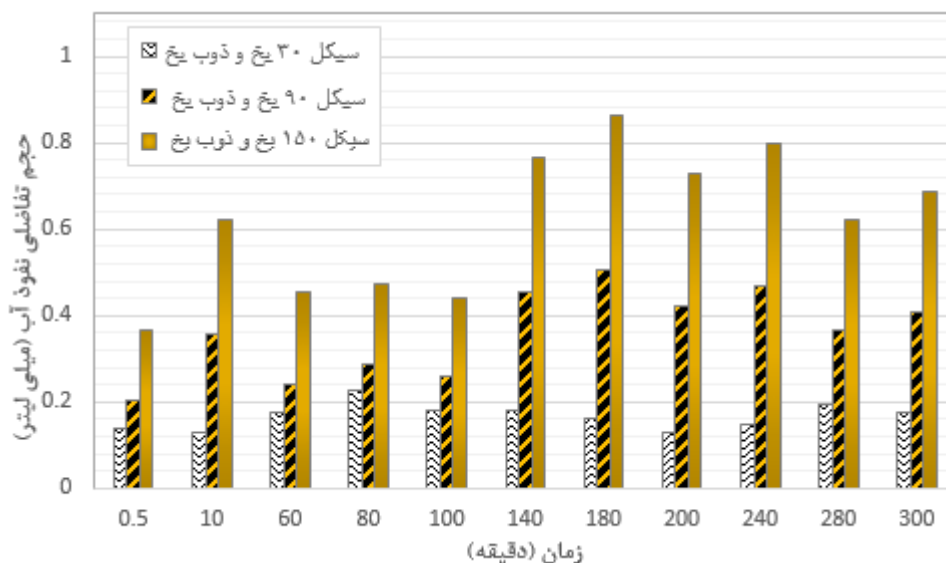
همان‌طور که در شکل ۴ (بخش ۶-۱) مشاهده شد، میزان کل نفوذ آب پس از ۳۰۰ دقیقه زمان در نمونه شاهد ورق GFRP به اندازه ۴/۸ میلی لیتر بود، این در حالیست که این میزان نفوذ در نمودار ۳۰ سیکل تغییر دما (شکل ۸) با ۲۰٪ افزایش به مقدار ۵/۷ میلی-لیتر رسیده است. مقدار کل نفوذ پس از ۳۰۰ دقیقه در نمودارهای بعدی یعنی ۹۰ سیکل و ۱۵۰ سیکل به ترتیب برابر ۸/۸۵ و ۱۵/۹ میلی‌لیتر روند افزایشی را دنبال می‌کند. بر اساس مطالعه صورت گرفته در مرجع [۳۱] افزایش نفوذ آب در تغییرات دمایی به دلیل ایجاد ترک حرارتی بین سطح مشترک الیاف و چسب گزارش شده است.

#### ۴-۶- نتایج نفوذپذیری تحت شرایط یخ و ذوب یخ

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایج مربوط به ورق‌های GFRP تحت سیکل یخ و ذوب یخ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه با ورق GFRP تحت سیکل یخ و ذوب یخ.

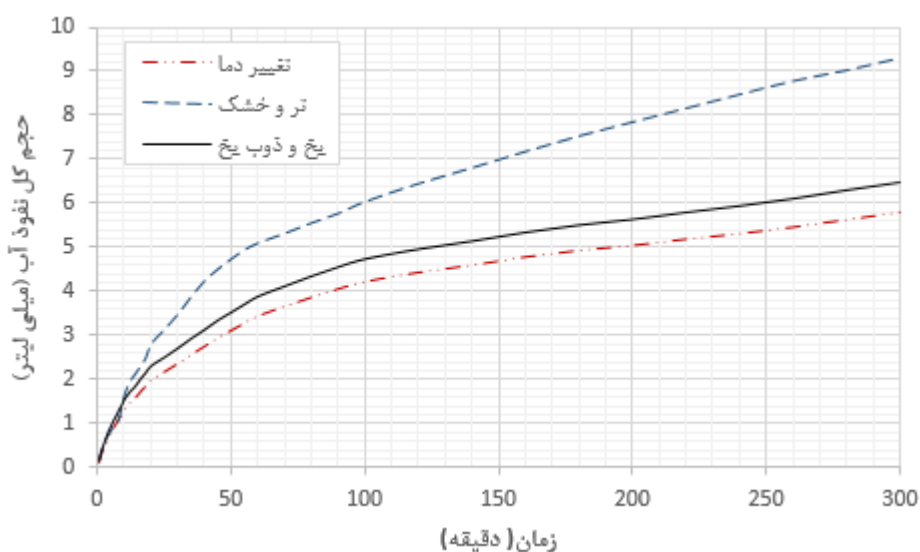


شکل ۱۱: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه با ورق GFRP تحت سیکل یخ و ذوب یخ.

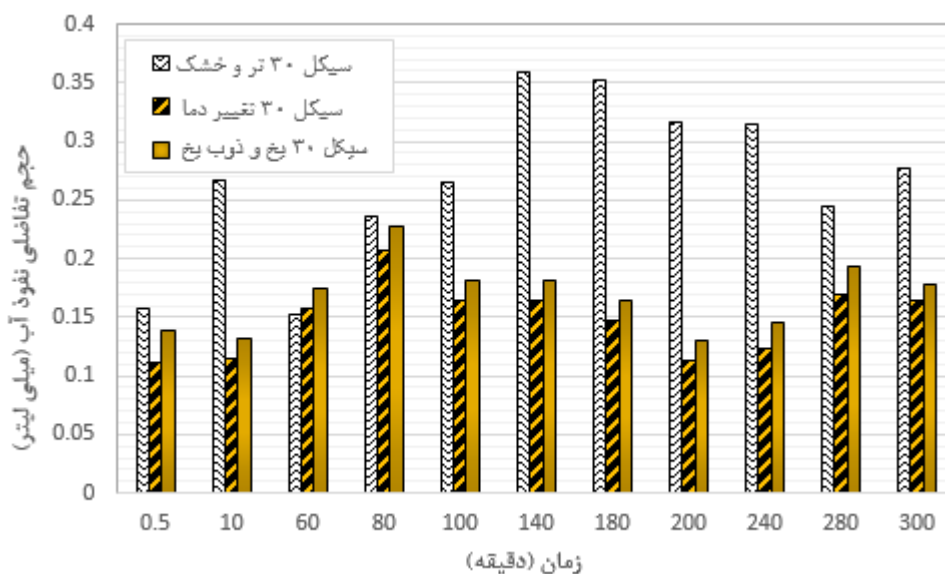
همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های یخ و ذوب یخ میزان حجم آب نفوذی و در نتیجه نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد، این در حالی است که در سیکل پایانی (سیکل ۱۵۰ام) نرخ افزایش حجم آب نفوذی با سرعت بیشتری نسبت به سیکل‌های اولیه صورت می‌پذیرد. مطابق نتایج گزارش شده در مرجع [۳۰] که به منظور ارزیابی دوام نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP انجام شد، شرایط یخ و ذوب یخ موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها به میزان ۴۹٪ نسبت به شرایط نرمال آزمایشگاهی می‌گردد، که علت آن متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی الیاف و رزین بیان شده است.

#### ۵-۶- مقایسه شرایط حاد محیطی با یکدیگر

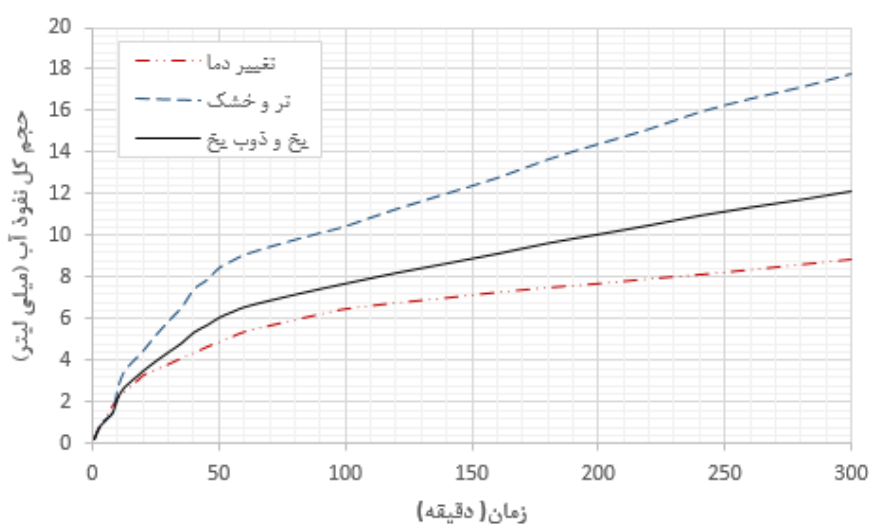
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ به منظور مقایسه شرایط محیطی حاد با یکدیگر (سیکل تر و خشک، یخ و ذوب یخ، تغییر دما) حجم کل نفوذ آب و حجم تفاضلی نفوذ آب در سیکل ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ نشان داده شده است.



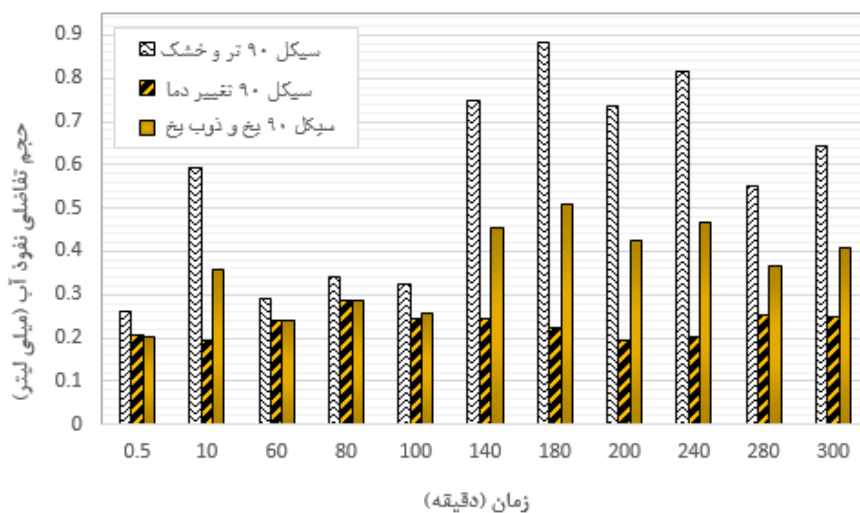
شکل ۱۲: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه با ورق GFRP، سیکل ۳۰ ام.



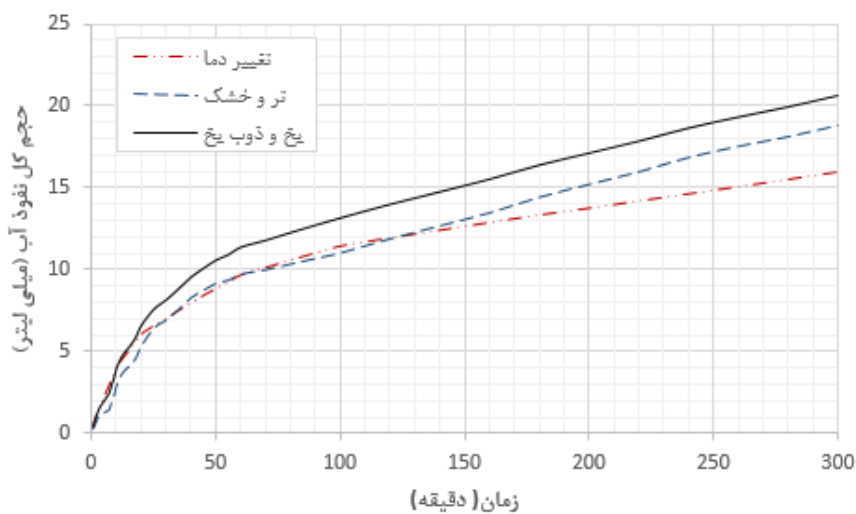
شکل ۱۳: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه با ورق GFRP، سیکل ۳۰ ام.



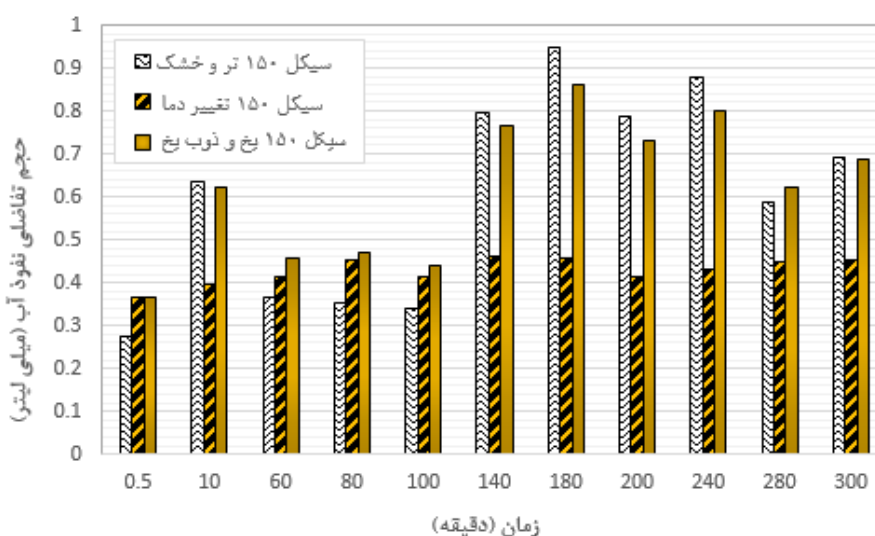
شکل ۱۴: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه با ورق GFRP، سیکل ۹۰م.



شکل ۱۵: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه با ورق GFRP، سیکل ۹۰م.



شکل ۱۶: مقایسه حجم کل نفوذ آب نمونه با ورق GFRP، سیکل ۱۵۰م.



شکل ۱۷: مقایسه حجم تفاضلی نفوذ آب نمونه با ورق GFRP، سیکل ۱۵۰ ام.

با توجه به شکل‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میزان حجم کل نفوذ آب در سیکل ۳۰ و ۹۰ تر و خشک بیشتر از یخ و ذوب و هم‌چنین تغییر دما می‌باشد، این در حالیست که در سیکل ۱۵۰ میزان نفوذ آب در شرایط یخ و ذوب بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌های ۷، ۹ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد، حجم تفاضلی نفوذ آب با افزایش تعداد سیکل افزایش یافته است. هم‌چنین با مقایسه شکل‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۷ می‌توان نتیجه گرفت، حجم تفاضلی نفوذ آب در سیکل ۳۰ و ۹۰ تحت شرایط تر و خشک از تغییر دما و یخ و ذوب یخ بیشتر است. این در حالیست که در سیکل ۱۵۰م حجم تفاضلی نفوذ آب تحت شرایط تغییر دما از دو شرایط دیگر کمتر می‌باشد.

به منظور مقایسه دقیق‌تر شرایط محیطی در نظر گرفته شده با یکدیگر، در جدول ۵ حجم کل نفوذ آب در پایان هر یک از سیکل‌های در نظر گرفته (زمان ۳۰۰ دقیقه) و درصد تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه شاهد آورده شده است.

جدول ۵: حجم کل نفوذ آب در ۳۰۰ دقیقه

نوع نمونه و شرایط محیطی		حجم کل نفوذ آب در ۳۰۰ دقیقه (میلی لیتر)
نمونه شاهد	نمونه بدون GFRP در شرایط نرمال آزمایشگاهی	۴۹/۳۵
	نمونه با GFRP در شرایط نرمال آزمایشگاهی	۴/۸۱
سیکل ۳۰ ام	ترو خشک	$۹/۳۱(-/۸۱)^1 (+/۹۳)^2$
	تغییر دما	$۵/۷۸(-/۸۸)^1 (+/۲۰)^2$
	یخ و ذوب یخ	$۶/۴۵(-/۸۶)^1 (+/۳۴)^2$
سیکل ۹۰ ام	ترو خشک	$۱۷/۷۳ (-/۶۴)^1 (+/۲۶۸)^2$
	تغییر دما	$۸/۸۵(-/۸۲)^1 (+/۸۴)^2$
	یخ و ذوب یخ	$۱۲/۱(-/۷۵)^1 (+/۱۵۲)^2$
سیکل ۱۵۰ ام	ترو خشک	$۱۸/۸۱(-/۶۱)^1 (+/۲۹۱)^2$
	تغییر دما	$۱۵/۹۲(-/۶۷)^1 (+/۲۳۱)^2$
	یخ و ذوب یخ	$۲۰/۱۶(-/۵۸)^1 (+/۳۲۸)^2$

<sup>۱</sup>مقادیر داخل پرانتز، درصدهای افزایشی حجم نفوذ آب در مقایسه با نمونه بدون GFRP تحت شرایط نرمال آزمایشگاهی است.

<sup>۲</sup>مقادیر داخل پرانتز، درصدهای افزایشی حجم نفوذ آب در مقایسه با نمونه با GFRP تحت شرایط نرمال آزمایشگاهی است.

نتایج بدست آمده حاکی از آن است که چنانچه نمونه بتنی با GFRP تقویت گردد و در معرض شرایط محیطی حاد (سیکل تر و خشک، سیکل تغییر دما و ...) قرار گیرد، بخصوص در سیکل‌های ابتدایی (سیکل ۳۰ ام) حجم نفوذ آب کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند. مطابق با نتایج جدول ۵ در سیکل ۱۳۰ام، بیشترین درصد کاهش نفوذپذیری مربوط به عامل تغییر دما است که برابر ۷۷٪ می‌باشد، این در حالیست که در این سیکل کمترین درصد کاهش نفوذپذیری تحت شرایط تر و خشک (۶۳٪ کاهش) رخ داده است. در سیکل ۹۰ نیز همین روند برقرار است، بدین ترتیب که با تقویت بتن توسط GFRP بیشترین کاهش نفوذپذیری در شرایط تغییر دما (۶۵٪) و کمترین کاهش در شرایط تر و خشک (۳۰٪) اتفاق می‌افتد. در سیکل ۱۵۰ام GFRP بیشترین اثرگذاری را تحت شرایط تغییر دما دارد و موجب کاهش ۳۷ درصدی نفوذپذیری می‌شود، این در حالیست که در این سیکل کمترین درصد کاهش مربوط به شرایط یخ و ذوب یخ با ۲۰٪ کاهش می‌باشد.

با توجه به جدول ۵ و مقایسه میزان حجم نفوذ آب در نمونه شاهد تقویت شده با GFRP و نمونه‌های موجود در شرایط حاد محیطی (تغییر دما، تر و خشک، یخ و ذوب یخ) می‌توان گفت شرایط حاد محیطی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد ورق GFRP دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حجم نفوذ آب در نمونه شاهد با GFRP برابر ۴/۸ میلی لیتر است، این در حالیست که این میزان در هر یک از شرایط حاد محیطی بسیار بیشتر است. بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که حجم نفوذ آب تحت شرایط تغییر دما، در سیکل ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ ام به ترتیب ۲۰٪، ۸۴٪ و ۲۳۱٪ افزایش یافته است، در حالی که این مقدار برای دو حالت تر و خشک و یخ و ذوب یخ بسیار بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت عملکرد ورق GFRP تحت شرایط تغییر دما کمتر دستخوش تغییر است. از آنجا که سیکل تر و خشک و همچنین یخ و ذوب یخ تاثیر ناشی از سیکل تغییرات دمایی را به صورت همزمان در داخل خود نهفته دارند، لذا طبیعی است که تاثیر آنها بیشتر از سیکل تغییرات دما باشد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر ورق GFRP در کاهش نفوذپذیری بتن در شرایط محیطی حاد پرداخته شد. بدین ترتیب که نفوذپذیری نمونه بتنی بدون ورق GFRP و نمونه بتنی تقویت شده با ورق GFRP، اندازه‌گیری شد. پیش از انجام آزمایش نفوذپذیری، نمونه‌های اشاره شده تحت سیکل‌های تغییر دما، تر و خشک و یخ و ذوب یخ قرار داده شدند. پس از انجام سیکل‌های مختلف و اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌ها، حجم کل و حجم تفاضلی نفوذ آب در سیکل‌های ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ بررسی گردید. در این پژوهش، جهت تعیین نفوذپذیری بتن از روش ابداعی و درجای "محفظه استوانه‌ای" بهره گرفته شد. از نقاط قوت این روش می‌توان به قابلیت انعطاف و کاربرد در اکثر شرایط موجود در محل پروژه و در آزمایشگاه اشاره نمود. هم‌چنین با کمترین هزینه، سریعترین زمان، کمترین خرابی، کمترین مهارت و تخصص و ... می‌توان به نتایج قابل اطمینان و دقیقی دست یافت که مطلوب تمامی پروژه‌ها می‌باشد. با توجه به مطالب ارائه شده، می‌توان نتایج اصلی را به شرح ذیل بیان نمود:

۱- رعایت دقیق درصدهای اختلاط ذکر شده در برگ اطلاعات فنی رزین‌های GFRP تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد صحیح ورق‌های GFRP دارد. هم‌چنین آماده‌سازی سطح بتن بر عملکرد مناسب ورق GFRP بسیار موثر است.

۲- استفاده از ورق GFRP به عنوان پوشش تقویت کننده بتن به میزان ۹۰٪ از نفوذپذیری بتن می‌کاهد.

۳- در نمونه تقویت شده با GFRP حجم نفوذ آب تحت شرایط تغییر دما کمتر از حالت تر و خشک و یخ و ذوب یخ بوده است. به عنوان نمونه در سیکل ۱۳۰ام حجم نفوذ در شرایط تغییر دما ۵/۷۸، در شرایط تر و خشک ۹/۳۱ و در شرایط یخ و ذوب ۶/۴۵ میلی‌لیتر می‌باشد. این مطلب بیانگر این است که تغییر دما کمترین اثر را بر ورق GFRP دارد.

۴- ورق GFRP در مقابل سیکل‌های تغییر دما به نسبت دیگر شرایط محیطی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

۵- در نمونه تقویت شده با GFRP حجم نفوذ آب در سیکل ۳۰ و ۹۰ تر و خشک بیشتر از دو حالت تغییر دما و یخ و ذوب یخ است. به عنوان نمونه در سیکل ۱۳۰ام تر و خشک حجم نفوذ برابر با ۹/۳۱ است، این در حالیست که در همین سیکل در شرایط تغییر دما حجم نفوذ

برابر با ۵/۷۸ (کاهش ۳۷ درصدی نسبت به شرایط تر و خشک) و در شرایط یخ و ذوب برابر با ۶/۴۵ (کاهش ۳۱ درصدی) می‌باشد. این مطلب بیانگر این است که عامل تر و خشک در سیکل ۳۰ و ۹۰ بیشترین اثر را بر عملکرد ورق GFRP دارد.

۶- در نمونه تقویت شده با GFRP حجم نفوذ آب در سیکل ۱۵۰ یخ و ذوب یخ به ترتیب ۲۹٪ و ۱۰٪ بیشتر از حالت تغییر دما و تر و خشک بوده، این مطلب بیانگر تاثیر بیشتر عامل یخ و ذوب یخ در سیکل ۱۵۰ ام بر ورق GFRP می‌باشد.

## مراجع

- [1] Sharp, B. N. (1996). Reinforced and prestressed concrete in maritime structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 116 (3), pp.449-469.
- [2] Rostásy, F. S. (1993). FRP Tensile Elements for Prestressed Concrete--State of the art, Potentials and limits. ACI Special Publication, 138, 347-366.
- [3] Soudki, K. and Alkhrdaji, T. (2005). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. In: Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond. New York: American Society of Civil Engineers, pp. 1-8.
- [4] Saenz, N., Walsh, E. J., Pantelides, C. P., and Adams, D. O. (2004). Long term durability of FRP composites for infrastructure rehabilitation. In: International SAMPE Symposium and Exhibition, Vol. 49, p. 2811.
- [5] Li, X., Xu, Q. and Chen, S. (2016). An experimental and numerical study on water permeability of concrete. Construction and Building Materials, 105, pp.503-510.
- [6] ACI CT-13. (2013). ACI concrete terminology. American Concrete Institute.
- [7] Phung, Q.T., Maes, N., De Schutter, G., Jacques, D. and Ye, G. (2013). Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method. Construction and Building Materials, 47, pp.1488-1496.
- [8] Banthia, N., Biparva, A. and Mindess, S. (2005). Permeability of concrete under stress. Cement and Concrete Research, 35 (9), pp.1651-1655.
- [9] Dashtibadfarid, M. and Afrasiabi, M. (2017). Low-Permeability Concrete: Water-to-Cement Ratio Optimization for Designing Drinking Water Reservoirs. International Journal of Innovations in Engineering and Science, 2 (11), pp 20-24.
- [10] Ahmad, S., Azad, A.K. and Loughlin, K.F. (2012). Effect of the key mixture parameters on tortuosity and permeability of concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 10 (3), pp.86-94.
- [11] Fu, T.C., Yeih, W., Chang, J.J. and Huang, R. (2014). The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. Advances in Materials Science and Engineering, pp.1-17.
- [12] Yu, Z., Ni, C., Tang, M. and Shen, X. (2018). Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash. Construction and building materials, 175, pp.458-466.
- [13] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Maghsoudi, M. and Siad, H. (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. Construction and building materials, 151, pp.292-311.
- [14] Gopalan, R., Somashekar, B. R. and Dattaguru, B. (1989). Environmental effects on fibre Polymer composites. Polymer degradation and stability, 24 (4), pp.361-371.
- [15] Bank, L. C., Gentry, T. R. and Barkatt, A. (1995). Accelerated test methods to determine the long-term behaviour of FRP composite structures: environmental effects. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14 (6), pp.559-587.
- [16] Bouadi, H. and Sun, C. T. (1989). Hydrothermal effects on the stress field of laminated composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 8 (1), pp.40-54.
- [17] Cusson, R. and Xi, Y. (2002). The behaviour of fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates Report No. CDOT-DTD-R-2003-4, Colorado Department of Transportation.
- [18] Hawkins, G. F., Steckel, G. L., Bauer, J. L. and Sultan, M. (1998). Qualification of composites for seismic retrofit of bridge columns. In: Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction: Proceedings of the First International Conference, Sherbrook: Sampe Society for the Advancement of Material, pp.25-36.



- [19] Gomez, J. and Casto, B. (1996). Freeze-thaw durability of composite materials. Virginia Transportation Research Council, Report no. VTRC 96-R25.
- [20] Toutanji, H. and El-Korchi, T. (1998). Tensile durability performance of cementitious composites externally wrapped with FRP sheets. In: Second International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation, Tucson.
- [21] Ojha, J. and Yazdani, N. (2013). Water permeability in fiber reinforced plastic (FRP) wrapped concrete beams. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 2 (2), pp.9-22.
- [22] ASTM C33. (2004). Standard specification for concrete aggregates. American Society for Testing and Material.
- [23] Banthia, N., Abdolrahimzadeh, A. and Boulfiza, M. (2009). Field assessment of FRP sheets-concrete bond durability. In: 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Bandung: ENSET Oran.
- [24] McSweeney, B. M. and Lopez, M. M. (2005). FRP-concrete bond behaviour: A parametric study through pull-off testing. ACI Special Publication, 230, pp.441-460.
- [25] Naderi, M. (2010). Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method. Registration of Patent in Companies and industrial property Office, Reg. N. 67726. Iran.
- [26] Naderi, M., Sheibani, R. and Shayanfar, M. A. (2009). Comparison of different curing effects on Concrete strength. In: 3rd International Conference on concrete and development, Tehran, Iran.
- [27] Ahmed, M.S., Kayali, O. and Anderson, W. (2008). Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods. Cement and Concrete Composites, 30 (7), pp.576-582.
- [28] Polder, R.B. and Peelen, W.H. (2002). Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. Cement and Concrete Composites, 24 (5), pp.427-435.
- [29] Zhang, P., Zhang, L. S., & Zhao, T. J. (2011). Water absorption properties of concrete after freeze-thaw damages. J Build Mater, 14(2), 155-159.
- [30] Bati, S.B. and Rotunno, T. (2001). Environmental durability of the bond between the CFRP composite materials and masonry structures. Historical Constructions, 114, pp.1039-1046.
- [31] Shimokawa, T., Katoh, H., Hamaguchi, Y., Sanbongi, S., Mizuno, H., Nakamura, H., Asagumo, R. and Tamura, H. (2002). Effect of thermal cycling on microcracking and strength degradation of high-temperature polymer composite materials for use in next-generation SST structures. Journal of composite materials, 36 (7), pp.885-895.