



## Assessing the compressive strength and permeability of protective coating layers applied to CFRP sheets, under harsh environmental conditions

R. Rahbari , M. Naderi\*

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

**ABSTRACT:** In this paper, the results of the effect of exposure of CFRP strengthened and coated 150mm concrete cubes to harsh environments are presented. The harsh environment included: wet-dry, freeze-thaw and different temperature change cycles. It is anticipated that the intended environmental conditions harm the performance of the CFRP sheet by reducing the compressive strength of concrete and, at the same time, increase its permeability. The test specimens used in this investigation included 150mm CFRP strengthened concrete cubes with and without protective coating layers. The methods employed were “Cylindrical Chamber” permeability, mortar capillary water absorption and mortar compressive strength tests. The results obtained tend to indicate that the proper selection of protective coating has a significant impact on the performance of the CFRP-coated concrete cubes that were under harsh environmental conditions. Application of suitable coatings onto the CFRP layer caused respective reductions of about 28%, 34%, and 36%, on the permeability of specimens after being exposed to specified wet-dry, freeze-thaw and temperature change cycles.

### Review History:

Received: Apr. 26, 2020  
Revised: Jul. 16, 2020  
Accepted: Jul. 17, 2020  
Available Online: Aug. 22, 2020

### Keywords:

Protective coating layer  
CFRP  
Permeability  
Capillary absorption  
Cylindrical chamber  
Harsh environment

## 1. INTRODUCTION

Nowadays, fiber-reinforced polymer sheets have been known to be one of the most effective composite materials that can be used to increase the strength and durability of concrete structures. Owing to the lightweight, corrosion resistance, high tensile strength and ease of application without any interruption of the services, the use of these sheets has become very widespread [1]. Despite the desirable properties of these materials, it should be noted that their durability and performance exposed to extreme environmental conditions appears to be a critical issue because of water penetration; in recent years, some organizations in Iran have opted for the use of FRP sheets for the strengthening and protection of their concrete structures that are located in the areas exposed to extreme environmental conditions. Most of the research performed on the performance of FRP sheets is limited to the evaluation of the bond strength of these sheets under acute environmental conditions. Therefore, the study of their permeability as the most important indicator of structural durability has been ignored. In this study, the permeability of CFRP sheets covering concrete cubes, under harsh environmental conditions has been investigated. In order to increase the long-term durability of these sheets under harsh environmental conditions, protective coating layers were applied to the CFRP sheets exposed surfaces. The purpose of this paper is to evaluate the performance

of these protective coating layers as a low-cost solution to increase the durability, performance and service life of these sheets. Therefore, the CFRP-covered concrete specimens, with and without protective coating layers, were exposed to acute environmental conditions, including freeze-thaw, wet-dry and temperature changes cycles. Noting the permeability as the most important determining factor for the long-term behavior of concrete structures [2], the permeability of these specimens was evaluated using the “Cylindrical chamber” method. Capillary water absorption and compressive strength of each protective coating layer were also measured at the end of the cyclic conditions mentioned above.

## 2. METHODOLOGY

As mentioned earlier, the permeability of the prepared specimens was measured using the “Cylindrical Chamber” method [3]. Before evaluating the capillary water absorption of the coating layers, they were cured for 7 days, and then they were subjected to freeze-thaw, wet-dry and temperature changes cycles. According to EN480-5 [4], capillary water absorption is obtained from Equation (1):

$$C = \frac{M_j - M_0}{1600} \quad (1)$$

In Equation (1),  $M_j$  is the specimen mass after the time required for absorption (gr),  $M_0$  is the specimen mass after seven days of curing (gr),  $C$  is the capillary adsorption at any

\*Corresponding author's email: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir



**Figure 1. Changes in total penetrated volume of water in 5 hours compared with those belonging to specimens without protective coating.**

Mortar type	Combination	Mixing ratio
Cement-based with fiber mortar	Cement-based adhesive	6
	Fiber	0.01 (0.3% ) volume fraction)
	Water	1
Epoxy-based waterproof mortar	Epoxy-based adhesive	4.5
	Resin	1
	Cement	1
Cement-sand with adhesive mortar	Sand	3
	Epoxy based adhesive	0.5
	Water	0.5
Air entrained cement-based fiber mortar	Cement-based adhesive	6
	Fiber	0.01 (0.3% volume fraction)
	Water	1
	Air content	0.012

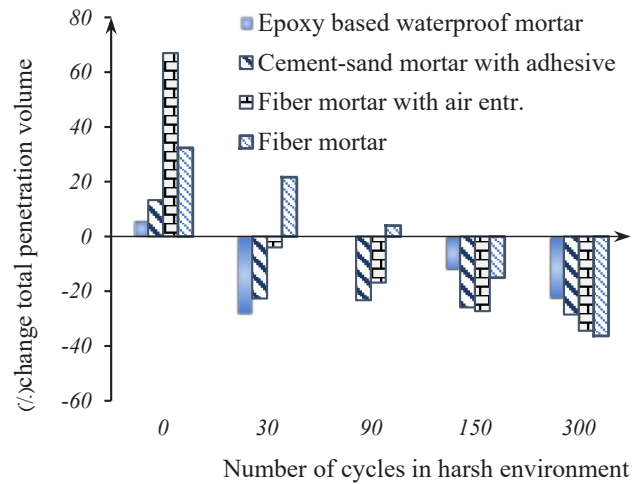
time (gr/mm<sup>2</sup>). To determine the compressive strength of the mortars employed, their 50 mm cubic specimens were tested after 28 days of standard curing.

In order to establish suitable protective coating layers, various materials were tested to combine them to create a mortar with the desired properties. After performing different experiments on mortars, four types of mortars with mixtures shown in Table 1 were selected. The first type of protective coating layer was a cement-based mortar with a polypropylene fiber that was used under temperature change conditions. For the wet-dry conditions, two types of mortar were employed which were a waterproof epoxy mortar and a cement-sand mortar with epoxy adhesive. For the freeze-thaw conditions, cement-based air-entrained mortar with fibers was used as one of the protective coating layers.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1. Capillary water absorption

According to the results obtained, the amount of capillary water absorbed by different mortars under laboratory conditions are as follows: fiber mortar = 3900 (gr/m<sup>2</sup>), epoxy-based waterproof mortar=3200 (gr/m<sup>2</sup>), cement sand with adhesive=3600 (gr/m<sup>2</sup>) and fiber mortar with entrained air=4300 (gr/m<sup>2</sup>). When the mortar specimens were exposed to 150 cycles of harsh environmental conditions, the increase in the amount of capillary absorbed water for the waterproof epoxy mortar increased by 46%, and the same respective value for the fiber mortar was seen to be 3%. Although the epoxy-based waterproof mortar had the lowest capillary absorption under laboratory conditions, but under the influence of wet-dry cycles, its water absorption increased dramatically.



**Table 1. Mix properties of coating layers**

#### 3.2. Compressive strength tests

The compressive strength of fiber mortar after exposure to 150 and 300 temperature change cycles decreased by about 6.4% and 14.4%, respectively. The results also showed that, the compressive strength of fiber mortar with entrained air after undergoing 150 and 300 cycles of.... decreased by 5.5% and 8%, respectively. After 150 and 300 cycles of wet-dry conditions, the compressive strength of epoxy-based waterproof mortar dropped by 19.8% and 53.5%, compared to the respective values obtained under laboratory conditions.

#### 3.3. Results of “Cylindrical Chamber” tests

In order to evaluate the performance and efficiency of the proposed protective coating layers, the percentage changes in the total penetrated water volume into the specimens are compared with the respective values belonging to the specimens without protective coating layer, in Figure 1.

As shown in Figure 1, the total volume of permeated water into the specimens with epoxy base waterproof coating in the laboratory (cycle 0) is 6% higher than the respective value belonging to the specimen without protective coating. The results have shown that exposure to the wet-dry, freeze-thaw and temperature changes cycles has negative effects on the performance of the CFRP sheet by increasing its permeability. Two types of protective coatings were applied to the surface of CFRP sheets in order to increase their durability under wet-dry cycles. The first one was an epoxy-based waterproof mortar. Figure 1 shows the changes in the total penetrated volume of water into the specimens after different cycles of exposure to the harsh environment, with and without coatings. It can be seen from Figure 1 that the penetrated volume of water into the specimen with the protective coating of epoxy base waterproof, after 300 cycles, has been reduced by 22%. The cement-sand with adhesive mortar coating applied to the surface of CFRP sheets was found effective in the wet-dry cycles, as it improved the permeability with respect to the uncoated ones. After 300 cycles, the penetrated volume

of water into the specimen with this protective coating has been reduced by 28%, compared with uncoated ones. CFRP sheets specimens with fiber mortar coating under temperature change showed a decrease of 36% in the total penetrated volume of water after 300 cycles. The air-entrained cement-based fiber mortar increased durability in comparison with the specimens without any coating when exposed to freeze-thaw cycles. The reduction in the penetrated volume into the specimen with this protective coating was approximately 34% after 300 cycles.

#### 4. CONCLUSIONS

In this paper, permeability, water absorption and compressive strength of protective coating layers of CFRP sheets under harsh environments are presented. Compared with the control specimen kept at normal laboratory conditions, the exposure of unprotected CFRP sheets to the wet-dry, freeze-thaw and temperature changes cycles recorded an increase in their penetrated volume of water. Freeze-thaw cycles had the most adverse effect on the performance of CFRP sheets. Using fiber mortar coating with an overall total thickness of 10 mm was demonstrated to give better protection under different temperature changes.

Protecting CFRP sheets by a 10 mm-thick layer of cement-sand mortar with adhesive reduced the penetration of water into the CFRP sheets under wet-dry cycles. Protection of the CFRP sheets with air-entrained cement-based fiber mortar may be recommended for use under the freeze-thaw situation because this coating reduces the penetration of water and thus increases the durability.

#### REFERENCES

- [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] Bantia, N., Biparva, A. and Mindess, S., 2005. "Permeability of concrete under stress". *Cement and Concrete Research*, 35(9), pp.1651-1655.
- [3] Naderi, M., 2010. "Determination of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method." Iran Registration of Patent in Companies and industrial property Office, Reg. N. 67726.
- [4] BSI, 2005. *BS EN 480-11: Admixtures for concrete, mortar and grout—test methods—determination of air void characteristics in hardened concrete.*

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Rahbari , M. Naderi, *Assessing the compressive strength and permeability of protective coating layers applied to CFRP sheets, under harsh environmental conditions, Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 963-966.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18324.6836](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18324.6836)







## ارزیابی مقاومت فشاری و نفوذپذیری پوشش‌های محافظ ورق‌های CFRP تحت شرایط حاد محیطی

محمود نادری\*، رزا رهبری

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

### کلمات کلیدی:

پوشش محافظ ورق‌های CFRP

نفوذپذیری

جذب موئینه

محفظه استوانه‌ای

شرایط حاد محیطی

**خلاصه:** در این مقاله نتایج بررسی تاثیر استفاده از پوشش‌های محافظ اعمال شده بر ورق‌های CFRP تقویت کننده بتن تحت شرایط حاد محیطی از جمله سیکل‌های تر و خشک شدگی، یخ و ذوب یخ و تغییرات دما ارائه شده است. معمولاً شرایط محیطی حاد موجب کاهش عملکرد ورق‌های CFRP، به دلیل افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام آن می‌گردد. به منظور محافظت از ورق‌های CFRP چهار نوع ملات الیافی پایه سیمانی، ملات الیافی حاوی ماده هوازا، ملات ماسه سیمان حاوی چسب اپوکسی، ملات آب‌بند پایه اپوکسی بر روی سطح آن‌ها اجرا گردید نمونه‌های به کار گرفته شده در این بررسی‌ها، شامل نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری بتن تقویت شده با ورق‌های CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ و نیز نمونه‌های مکعبی و منشوری ساخته شده از ملات (پوشش‌های محافظ) می‌باشند. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش نفوذپذیری با به کارگیری روش "محفظه استوانه‌ای"، آزمایش جذب آب موئینه ملات و تعیین مقاومت فشاری ملات، قبل و بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها تحت شرایط حاد می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که انتخاب مناسب پوشش محافظ تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر دوام نمونه‌های تقویت شده با CFRP و کاهش نفوذپذیری آن‌ها تحت هر یک از شرایط حاد محیطی داشته است. به طوری که استفاده از این پوشش‌ها در نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق CFRP، تحت شرایط تر و خشک شدگی، یخ و ذوب یخ و تغییرات دما، موجب کاهش نفوذپذیری به میزان ۲۸٪، ۳۴٪ و ۳۶٪ شده است.

### ۱- مقدمه

قرار می‌گیرند [۲]. علی‌رغم ویژگی‌های مطلوب این مصالح، باید به این نکته توجه نمود که دوام و عملکرد آن‌ها در محیط‌های خاص که مجموعه‌ای از عوامل مخرب محیطی در آن وجود دارند، احساس می‌شود [۳].

از جمله مکانیزم‌هایی 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

در سال‌های اخیر استفاده از مصالح نوین در ساخت سازه‌ها به منظور سبک‌سازی، افزایش کارایی و سرعت اجرا، رشد چشمگیری داشته است. در بین این مصالح استفاده از مقاطع کامپوزیت بتن پلیمری در سازه‌های پل‌ها، اسکله‌ها و ساختمان‌های بلند مرتبه مزایای قابل توجهی دارد [۱]. از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون در سراسر دنیا پلیمرهای مسلح به الیاف<sup>۱</sup> به صورت پوشش‌های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود مورد استفاده

1 FRP

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

می‌کاهد. 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 [۵]. نفوذ آب در بتن عامل مهمی در دوام بتن تحت شرایط سیکل‌های ذوب و یخ متوالی، تر و خشک شدگی و تغییرات دما است. هر چه آب بیشتری در بتن نفوذ کند، تخریب بیشتری را در پی خواهد داشت. تحقیقات بسیاری در زمینه عوامل مؤثر بر نفوذپذیری بتن انجام گرفته است. از جمله این عوامل می‌توان به نسبت آب به سیمان [۶]، مقدار سنگدانه‌ها [۷]، اندازه سنگدانه‌ها [۸]، مشخصات ریزساختاری [۹] و تاثیر افزودنی‌ها [۱۰] اشاره نمود. مشاهده می‌شود که تغییر در نسبت‌های اختلاط به شدت بر میزان نفوذپذیری نمونه بتنی تأثیرگذار است. در ادامه تعدادی از تحقیقات انجام شده بر روی دوام مصالح FRP تحت شرایط محیطی خاص آورده شده است.

بلاربی<sup>۱</sup> و همکاران به بررسی شرایط محیطی مختلف بر روی رفتار طولانی مدت ستون‌های بتنی مسلح تقویت شده با ورق‌های کربن/اپوکسی<sup>۲</sup> و شیشه/اپوکسی<sup>۳</sup> پرداختند. در بین سیکل‌های طراحی شده در این تحقیق آب شور تاثیر زیادی بر کاهش بار نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده با ورق شیشه/اپوکسی داشت [۱۱]. در تحقیق انجام شده بر روی نمونه‌های دورپیچ شده با ورق کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی بیشترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه‌های دورپیچ شده با ورق شیشه/اپوکسی در محیط با دمای بالا به همراه سیکل تر و خشک آب شور بوده است [۱۲]. در مطالعاتی که به بررسی اثر آب شور بر دوام مصالح FRP اختصاص داشت، مشخص شد که تماس با آب شور موجب کاهش شدید مقاومت ستون‌های تقویت شده با ورق‌های شیشه/اپوکسی شده است. همچنین در مواجهه با آب شور اولین اثر تخریبی از ناحیه رطوبت بوده، این در حالیست که با گذشت زمان تشکیل کریستال‌های نمک درون میکرو ترک‌ها موجب تخریب این ورق‌ها شده است [۱۳].

خواص انواع کامپوزیت‌ها از قبیل الیاف کربن، شیشه و آرامید که به مدت ۲۰ روز در آب با دمای ۲۳+ و ۷۰+ درجه سانتی‌گراد مستغرق بودند توسط گوپالان<sup>۴</sup> و همکاران، مورد مطالعه قرار گرفت.

- 1 Belarbi
- 2 CFRP
- 3 GFRP
- 4 Gopalan

نتایج به دست آمده نشان داد که آب در بین سطح مشترک الیاف و رزین و در فضاهای خالی نفوذ می‌نماید [۱۴]. دوام مواد کامپوزیتی تحت شرایط محیطی مختلف توسط بانک<sup>۵</sup> و همکاران بررسی گردید. در مطالعه ذکر شده اثرات حرارت، رطوبت و ترکیبات شیمیایی نیز در نظر گرفته شد که موجب کاهش چشم‌گیر عملکرد مواد کامپوزیتی گردید [۱۵]. در مطالعه آزمایشگاهی با قرار دادن نمونه‌های FRP در آب شور مشاهده شد که این محیط اثر تخریبی زیادی بر روی خواص مکانیکی این مصالح داشته است. همچنین اثر تخریبی این محیط با افزایش دما بیشتر مشاهده شده است [۱۶]. همچنین مطالعه‌ی عملکرد لایه‌های FRP در دمای پایین نشان داد که الیاف کربن و شیشه در دمای پایین نسبت به الیاف‌های دیگر، مصالح مناسب‌تری می‌باشند [۱۷]. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش دوام و عملکرد ورق‌های CFRP در مواجهه با شرایط محیطی مخرب است.

با توجه به اینکه امروزه بسیاری از سازه‌های تقویت شده با ورق FRP همچون پایه پل‌های موجود در سواحل و سطوح آبیگر اسکله‌های بتنی در معرض شرایط محیطی حاد قرار دارند، بنابراین دوام و عملکرد آن‌ها در این شرایط محیطی دستخوش تغییرات زیادی قرار می‌گیرد. اکثر تحقیقات انجام گرفته در بررسی عملکرد ورق‌های FRP به ارزیابی مقاومت چسبندگی این ورق‌ها تحت شرایط محیطی حاد محدود می‌شود و مطالعه بر نفوذپذیری آن‌ها به عنوان مهم‌ترین شاخص ارزیابی دوام سازه کمتر انجام شده است. در این مطالعه به بررسی نفوذپذیری ورق‌های CFRP تقویت کننده بتن تحت شرایط حاد محیطی پرداخته شده است و با توجه به کاهش عملکرد بلند مدت این ورق‌ها تحت شرایط محیطی حاد از پوشش‌های محافظ استفاده گردید. هدف از مقاله حاضر، بررسی عملکرد پوشش‌های محافظ اعمال شده بر روی ورق‌های CFRP به عنوان راهکاری کم هزینه برای افزایش دوام، کارایی و عمر مفید این ورق‌ها می‌باشد. روش تحقیق مبتنی بر روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. روند کلی کار به این صورت است که نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ در معرض شرایط حاد محیطی از جمله سیکل یخ و ذوب یخ، تغییرات دما و تر و خشک شدگی قرار داده می‌شوند. از آنجایی که نفوذپذیری مهم‌ترین مشخصه‌ای است که رفتار بلندمدت سازه بتنی را مشخص می‌کند [۱۸]، بنابراین



ب) اجزای مختلف دستگاه



الف) صفحه فلزی اعمال شده به سطح مورد نظر

شکل ۱. دستگاه "محفظه استوانه‌ای"

Fig. 1. "Cylindrical Chamber" apparatus. (a) Disk applied to surface of specimen. (b) Different component of apparatus

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 (شکل ۱-الف). 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 (شکل ۱-ب). سپس محفظه دستگاه پر از آب و هواگیری شده و با پیچاندن اهرم دستی، فشار ثابت آب مورد نظر تامین می‌گردد که توسط فشارسنج عقربه‌ای قابل مشاهده است. مقدار نفوذ آب، با رویت میکرومتر عقربه‌ای، در زمان‌های مختلف ثبت می‌گردد.

این آزمایش قابلیت انجام روی سطوح افقی (دال‌ها و عرشه پل) و عمودی (ستون‌ها) را دارد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۰]:

- 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.

نفوذپذیری این نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین جذب آب موئینه و مقاومت فشاری هر یک از پوشش‌های محافظ نیز تحت سیکل‌های ذکر شده اندازه‌گیری و بررسی می‌شود.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

۱-۲- اندازه‌گیری نفوذپذیری با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" اندازه‌گیری نفوذپذیری با روش‌های مرسوم نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات گوناگون و با حجم بالا دارد. همچنین به دلیل زمان‌بر بودن انجام این آزمایش‌ها، هزینه انجام آن‌ها نیز زیاد است. از طرفی اکثر آزمایش‌های 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 استوانه‌ای" که روشی نوین برای اندازه‌گیری نفوذپذیری است، انجام شده است. این روش که توسط نادری ابداع شده است [۱۹]، 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 استوانه‌ای" در دنیا شناخته شده است و قابلیت آزمایش بر روی اتصالات بتنی و ژئوممبران‌ها با امکان انجام آزمایش قبل و بعد از نصب آن‌ها را دارد. دستگاه آزمایش "محفظه استوانه‌ای" در شکل ۱ نشان داده شده است.

نحوه انجام آزمایش بدین شرح است که در ابتدا سطح مورد نظر



(ج) نمونه‌های منشوری ملات

(ب) نمونه‌های بتنی تقویت شده با CFRP با و بدون پوشش محافظ

(الف) نمونه‌های مکعبی ملات

شکل ۲. نمونه‌های مورد آزمایش

Fig. 2. Specimens prepared test (a) Cube specimens of mortar (b) concrete specimens Reinforced with CFRP with and without protective coating (c) prismatic specimens of mortar



(ج) آزمایش جذب آب موئینه

(ب) آزمایش تعیین نفوذپذیری به روش "محفظه استوانه‌ای"

(الف) آزمایش مقاومت فشاری

شکل ۳. آزمایش‌های انجام شده

Fig. 3. Tests performed (a) compressive strength test (b) "Cylindrical chamber" test (c) Capillary water absorption test

که در آن  $V$  حجم آب نفوذی بر حسب میلی‌متر مکعب،  $h$  قرائت میکرومتر بر حسب میلی‌متر،  $A$  مقطع اعمال فشار بر حسب میلی‌متر مربع،  $Q$  نرخ نفوذ آب بر حسب  $(mm^3/s)$ ،  $t$  زمان بر حسب ثانیه است.

۲-۲- اندازه‌گیری جذب آب موئینه بر اساس استاندارد EN480-5 این آزمایش بدین صورت است که نمونه‌های  $160 \times 40 \times 40$  میلی‌متری پس از سن عمل‌آوری در داخل اون در دمای  $50^\circ C$  خشک شده و وزن می‌شوند. سپس نمونه‌ها به صورت عمودی در

قابلیت استفاده برای سایر مصالح مانند سنگ، ملات، سفال، آجر فشاری و ... را دارد.

قابلیت ارزیابی نفوذپذیری سازه در محل را دارد. در آزمایش "محفظه استوانه‌ای" حجم آب نفوذ کرده به نمونه و نرخ نفوذ آب در زمان قرائت میکرومتر توسط روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$V = h \times A \quad (1)$$

$$Q = \frac{dv}{dt} \quad (2)$$



جدول ۳. مشخصات ورق‌های دارای الیاف کربن

Table 3. Properties of CFRP sheets

مدول الاستیسیته الیاف (MPa)	۲۳۰۰۰
مقاومت نهایی (MPa)	۴۹۰۰
کرنش نهایی	۰/۰۱۶

جدول ۴. مشخصات چسب به کار گرفته شده

Table 4. Properties of adhesive

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

### ۳-۲- اندازه‌گیری مقاومت فشاری لایه محافظ

تعیین مقاومت فشاری هر یک از ملات‌های اعمال شده بر ورق CFRP بر اساس استاندارد ASTM C109 [۲۴] انجام شد. بدین ترتیب که برای هر یک از پوشش‌های در نظر گرفته شده نمونه مکعبی ۵۰ میلی‌متری ساخته شد و پس از عمل‌آوری آن‌ها به مدت ۲۸ روز مقاومت فشاری اندازه‌گیری شد. در شکل ۲ روند آماده سازی نمونه‌ها و در شکل ۳ آزمایش‌های شرح داده شده، نشان داده شده است.

### ۴-۲- مصالح به کار گرفته شده

در این تحقیق، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مقاوم شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ساخت نمونه‌های بتنی سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه آبیگ قزوین با وزن مخصوص (ton/m<sup>3</sup>) ۳/۱۵ می‌باشد. طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. درشت دانه شکسته مطابق با استاندارد ASTM-C33 [۲۵] استفاده گردید. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. شن و ماسه مصرفی محصول معدن قدس ۱ واقع در شهریار بوده و قبل از ساخت نمونه‌ها سنگدانه‌های مصرف شده شسته و خشک گردیدند. مشخصات سنگدانه مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری با روش "محفظه استوانه‌ای" نمونه‌های بتنی ساخته شده، مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشند. ورق‌های

جدول ۱. طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در یک متر مکعب

Table 1. Mix properties of the concrete (1 m<sup>3</sup>)

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 سنگدانه مصرفی در بتن

Table 2. Properties of aggregates in concrete

درشت دانه		ریزدانه	
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	درصد جذب آب	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
۲/۶۵	۱۶۹۰	۰/۶	۲/۵۷
		درصد جذب آب	درصد جذب آب
		۰/۹	۰/۹

داخل ظرف آب به نحوی قرار می‌گیرند که ۳ میلی‌متر از کف آن‌ها در داخل آب قرار گرفته و آب از پایین نمونه‌ها امکان نفوذ داشته باشد. با تعیین وزن نمونه در زمان‌های مشخص پس از ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲ ساعت و روز اول تا هشتم جذب آب موئینه نمونه‌ها تعیین می‌گردد.

به منظور بررسی جذب آب موئینه هر یک از ملات‌های مورد بررسی، پس از ساخت نمونه‌های منشوری و عمل‌آوری به مدت ۷ روز، تحت سیکل‌های تر و خشک شدگی، یخ و ذوب یخ و تغییر دما قرار داده شدند. بر اساس استاندارد 5-EN480 [۲۱] جذب موئینه در هر زمان از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$C = \frac{M_j - M_0}{1600} \quad (3)$$

در رابطه (۳)  $M_j$  جرم نمونه بعد از زمان لازم برای جذب (gr)،  $M_0$  جرم نمونه بعد از عمل‌آوری هفت روز (gr)، C جذب موئینه در هر زمان (gr/mm<sup>2</sup>) می‌باشد. از طرفی جذب آب موئینه به عنوان تابعی از زمان مطابق با رابطه (۴) می‌باشد [۲۲ و ۲۳].

$$C = S\sqrt{t} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، S ضریب جذب موئینه آب، t زمان (min) و C ضریب جذب موئینه (gr/mm<sup>2</sup>) می‌باشد.

جدول ۵. مشخصات الیاف پلی پروپیلن  
Table 5. Properties of polypropylene fibers

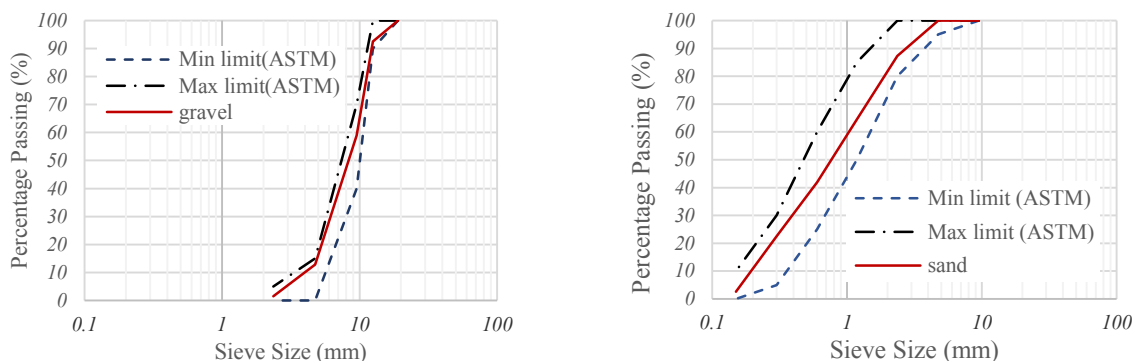
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	قطر (μm)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (GPa)
۰/۹۱	۲۳	۵	۰/۵

جدول ۶. طرح اختلاط ملات‌های استفاده شده به عنوان پوشش محافظ  
Table 6. Mix properties of mortar for coating layer

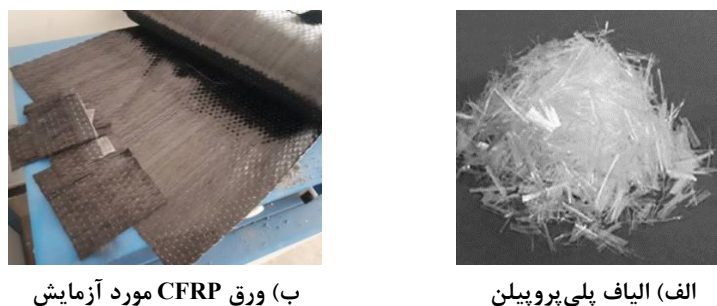
نسبت اختلاط	ترکیبات	نام پوشش
۶	ماده چسباننده پایه سیمانی	ملات الیافی پایه
۰/۳ درصد حجمی) ۰/۰۱	الیاف	سیمانی
۱	آب	
۴/۵	ماده چسباننده پایه اپوکسی	ملات آب‌بند پایه اپوکسی
۱	رزین	
۱	سیمان	ملات ماسه
۳	ماسه استاندارد ۱۶۱	سیمان حاوی
۰/۵	چسب پایه اپوکسی	چسب
۰/۵	آب	
۶	ماده چسباننده پایه سیمانی	ملات الیافی
۰/۳ درصد حجمی) ۰/۰۱	الیاف	حاوی ماده هوازا
۱	آب	
۰/۰۱۲	ماده هوازا	

پوشش محافظ نوع اول، ملات الیافی پایه سیمانی بود که تحت شرایط تغییر دما از آن استفاده شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن خطر قلوه‌کن شدن بتن تحت حرارت بالا را تا حدی زیادی کاهش می‌دهد. مقبول‌ترین تئوری در زمینه توجیه این پدیده، ذوب شدن الیاف در اثر حرارت و در نتیجه ایجاد فضا برای فشار ایجاد شده از بخار است [۲۶]. برای شرایط تغییر دما از نوعی ملات پایه سیمانی دارای ۰/۳٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن استفاده گردید. مشخصات الیاف مورد استفاده در این ملات در جدول ۵ آورده شده است.

FRP به کار گرفته شده از نوع الیاف کربن (CFRP) می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۳ آورده شده است. برای چسباندن ورق CFRP به سطح نمونه‌های بتنی از چسب دو جزئی که یک جزء آن رزین و جزء دیگر سخت کننده می‌باشد استفاده شده است. مشخصات این چسب در جدول ۴ نشان داده شده است. برای رسیدن به پوشش محافظ مناسب، مصالح مختلفی مورد آزمایش قرار گرفتند تا از ترکیب آن‌ها ملاتی با ویژگی‌های مطلوب ایجاد شود. با انجام آزمایشات متعدد بر روی ملات‌های تشکیل شده، نهایتاً ۴ نوع ملات با نسبت‌های اختلاط جدول ۶ انتخاب شد.



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها  
Fig. 4. Grading of aggregate curve



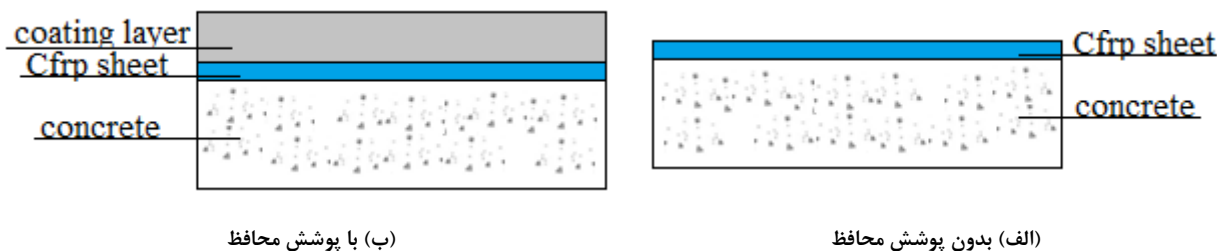
شکل ۵. مصالح مصرفی مورد آمایش  
Fig. 5. Materials for tested (a) Polypropylene fibers (b) CFRP sheets

عنوان پوشش محافظ استفاده شد. جزئیات طرح اختلاط ملات‌های پوششی در جدول ۶ آورده شده است. در این تحقیق ضخامت تمامی ملات‌های پوششی اعمال شده بر ورق‌های CFRP ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۶ تصویر شماتیک بتن تقویت شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ نشان داده شده است. مطابق با نتایج جدول ۷، در شرایط نرمال آزمایشگاهی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات الیافی، ملات ماسه سیمان با چسب و ملات الیافی با ماده هوزا به ترتیب برابر با ۴۵، ۴۵/۷ و ۴۳/۴ مگاپاسکال به دست آمد که بسیار به هم نزدیک می‌باشند. ملات آب‌بند پایه اپوکسی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۷ مگاپاسکال کمترین مقاومت فشاری را در شرایط نرمال آزمایشگاهی در مقایسه با سه نوع پوشش دیگر دارد. با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۷، در سیکل ۱۱۵۰ام مقاومت فشاری ملات الیافی در شرایط تغییر دما ۶٪ و ملات الیافی حاوی

در شکل ۵ الیاف پلی پروپیلن مصرفی در ملات پوششی پایه سیمانی و ورق CFRP تقویت کننده بتن نشان داده شده است. برای شرایط تر و خشک شدگی از دو نوع ملات، یکی نوعی ملات آب‌بند پایه اپوکسی و دیگری ملات ماسه سیمان به همراه چسب اپوکسی استفاده شد.

دوام پوشش بتن در برابر سیکل‌های یخبندان و ذوب یخ از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. یکی از عواملی که در افزایش مقاومت در برابر سیکل یخ و ذوب یخ تاثیر بسزایی دارد مواد هوزا است. این مواد با ایجاد حباب‌های تصادفی فضای کافی برای انبساط آب درون بتن ایجاد می‌کنند و از فشار ایجاد شده ناشی از یخبندان درون بتن می‌کاهند [۲۷]. همچنین محققین بسیاری تاثیر الیاف بر مقاومت بتن در برابر پوسته پوسته شدن ناشی از چرخه‌های یخ و ذوب یخ را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۲۸ و ۲۹]. از این رو در شرایط یخ و ذوب یخ از ملات پایه سیمانی دارای الیاف حاوی ماده هوزا به



شکل ۶. تصویر شماتیک نمونه بتنی تقویت شده با ورق CFRP

Fig. 6. Schematic image of concrete reinforced with CFRP (a) without protective coating (b) with protective coating

جدول ۷. تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه پوشش‌های محافظ تحت سیکل‌های مختلف شرایط محیطی

Table 7. Compressive strength changes of protective coatings under different cycles of environmental conditions

نام پوشش	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		
	سیکل ۰	سیکل ۱۵۰	سیکل ۳۰۰
ملات الیافی	۴۵	۴۲/۱(۶/۴) <sup>۱</sup>	۳۸/۵(۱۴/۴) <sup>۱</sup>
پایه سیمانی			
ملات آب‌بند	۳۷/۲	۲۹/۸(۱۹/۸) <sup>۱</sup>	۱۷/۳(۵۳/۵) <sup>۱</sup>
پایه اپوکسی			
ملات ماسه			
سیمان حاوی چسب	۴۵/۷	۳۸/۵(۱۵/۷) <sup>۱</sup>	۳۲/۷(۲۸/۴) <sup>۱</sup>
ملات الیافی			
حاوی ماده	۴۳/۴	۴۱(۵/۵) <sup>۱</sup>	۳۹/۸(۸/۲) <sup>۱</sup>
هوازا			

<sup>۱</sup>مقادیر داخل پرانتز، درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به سیکل ۰ می‌باشد.

کرده است. این در حالیست که پوشش الیافی حاوی ماده هوازا تحت شرایط یخ و ذوب در این سیکل به میزان ۸٪ کاهش داشته است. مقاومت فشاری پوشش آب‌بند پایه اپوکسی تحت شرایط تر و خشک شدگی در سیکل ۳۰۰ با ۵۳/۵٪ کاهش نسبت به شرایط نرمال آزمایشگاهی به مقدار ۱۷/۳ مگاپاسکال رسید. پوشش ماسه سیمان حاوی چسب در شرایط مشابه تر و خشک شدگی در این سیکل ۳۲/۷ مگاپاسکال رسیده است. به عبارت دیگر شرایط تر و خشک شدگی موجب کاهش مقاومت فشاری این ملات به اندازه ۱۵/۷٪ و ۲۸/۴٪ شده است. با مقایسه مقاومت دو ملات آب‌بند پایه اپوکسی و ملات ماسه سیمان حاوی چسب در سیکل‌های مختلف تر و خشک شدگی می‌توان به این نتیجه رسید که ملات ماسه سیمان حاوی چسب با

هوازا در شرایط یخ و ذوب یخ ۵٪ کاهش یافته است. با توجه به اثرات تخریبی شدیدتر شرایط یخ و ذوب نسبت به شرایط تغییر دما می‌توان به این نتیجه رسید که با افزودن مقدار مناسب ماده هوازا می‌توان مقاومت ملات الیافی را تحت شرایط یخ و ذوب یخ به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. مطابق با نتایج به دست آمده، مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان حاوی چسب در ۱۵۰ سیکل تر و خشک شدگی نسبت به شرایط نرمال آزمایشگاهی ۱۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت فشاری در این سیکل مربوط به پوشش آب‌بند پایه اپوکسی با ۲۰٪ کاهش می‌باشد.

همانطور که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری پوشش الیافی تحت شرایط تغییر دمایی در سیکل پایانی ۳۰۰، ۱۴/۴٪ افت



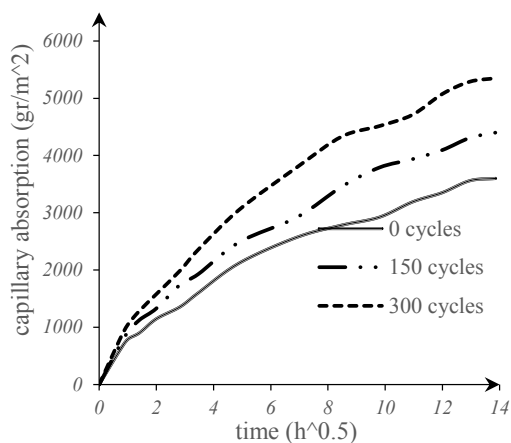
(ج) تر و خشک شدگی

(ب) یخ و ذوب یخ

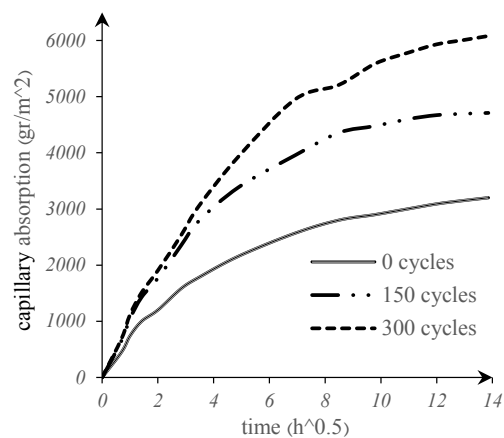
(الف) تغییرات دما

شکل ۷. اعمال شرایط حاد محیطی

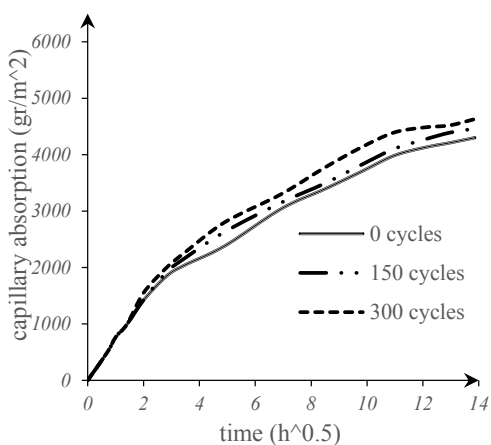
Fig. 7. Applying acute environmental conditions (a) temperature changes (b) freeze-thaw (c) wet-dry



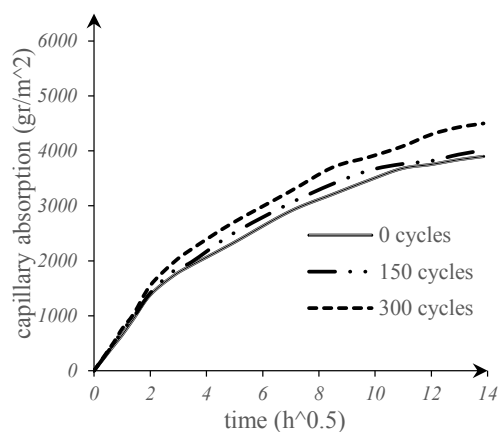
(ب) پوشش ماسه سیمان حاوی چسب تحت سیکل تر و خشک شدگی.



(الف) پوشش آب بند پایه اپوکسی تحت سیکل تر و خشک شدگی.



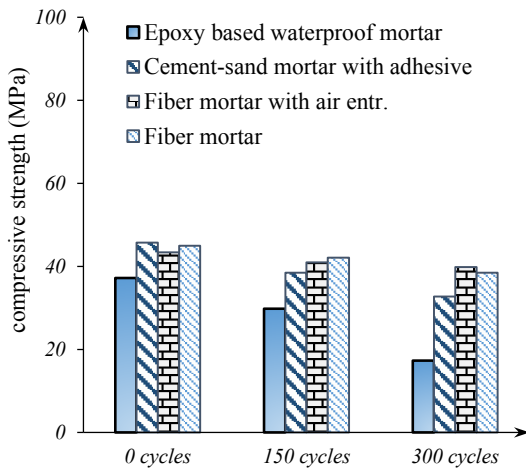
(د) پوشش الیافی حاوی ماده هوازا تحت سیکل یخ و ذوب یخ.



(ج) پوشش الیافی تحت سیکل تغییرات دما.

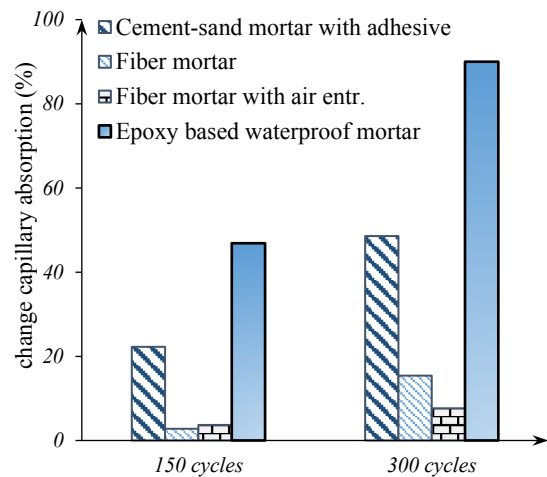
شکل ۸. جذب آب موئینه پوشش های محافظ تحت شرایط محیطی مختلف

Fig. 8. Capillary absorption of coatings under different environmental conditions (a) Epoxy based waterproof coating under wet-dry cycle (b) Cement-sand coating with adhesive under wet-dry cycle (c) Fiber coating under temperature changes (d) Fiber coating with air entr. Under freeze-thaw cycle.



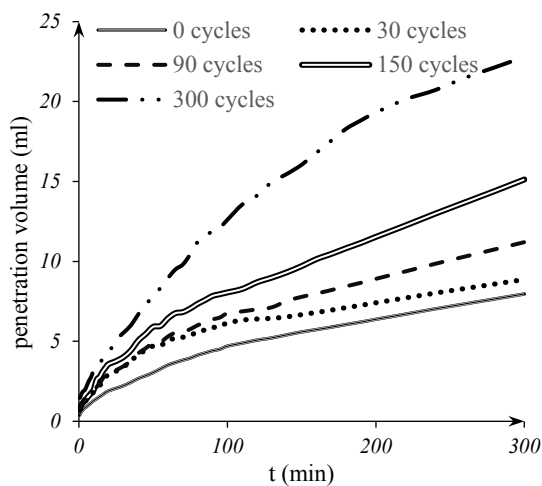
شکل ۱۰. مقاومت فشاری ۲۸ روزه پوشش‌های محافظ تحت سیکل‌های مختلف شرایط محیطی

Fig. 10. Compressive strength of coatings under different cycles of environmental conditions

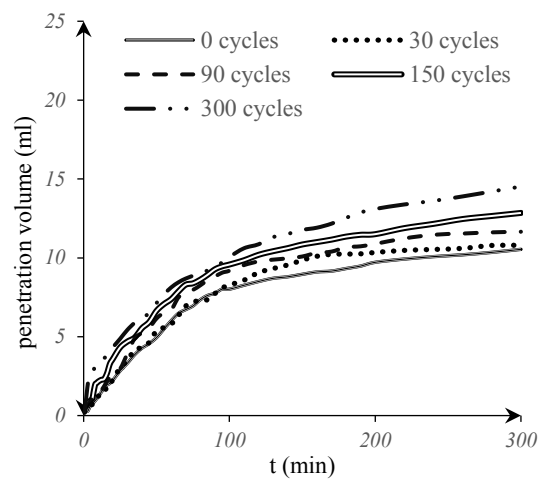


شکل ۹. درصد افزایش جذب آب موئینه نسبت به سیکل

Fig. 9. Percentage of increase in capillary absorption compared to cycle



(ب) بدون پوشش محافظ.



(الف) با پوشش الیافی.

شکل ۱۱. حجم نفوذ-زمان تحت شرایط تغییر دما

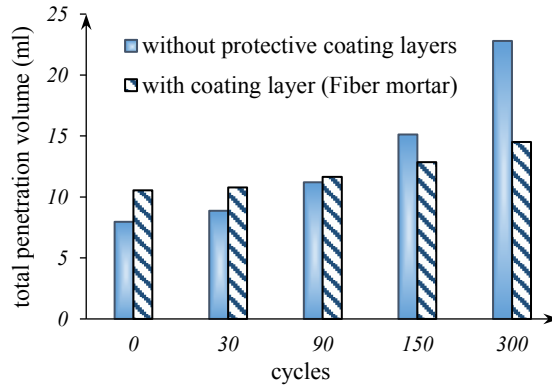
Fig. 11. Penetration volume-time under temperature change conditions (a) With fiber coating (b) without coating

الیاف CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ، تحت شرایط تغییر دما نشان داده شده است. مقدار نفوذپذیری نمونه‌ها با استفاده از آزمایش "محفظه استوانه‌ای" در پایان سیکل‌های ۰، ۳۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در شرایط تغییر دما از پوشش الیافی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. مقدار فشار در نظر گرفته شده در دستگاه "محفظه استوانه‌ای" ۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. نتایج ارائه شده در هر

توجه به کاهش کمتر مقاومت فشاری در تمامی سیکل‌های اعمالی نسبت به ملات آب‌بند پایه اپوکسی ملات پوششی مناسب‌تری می‌باشد.

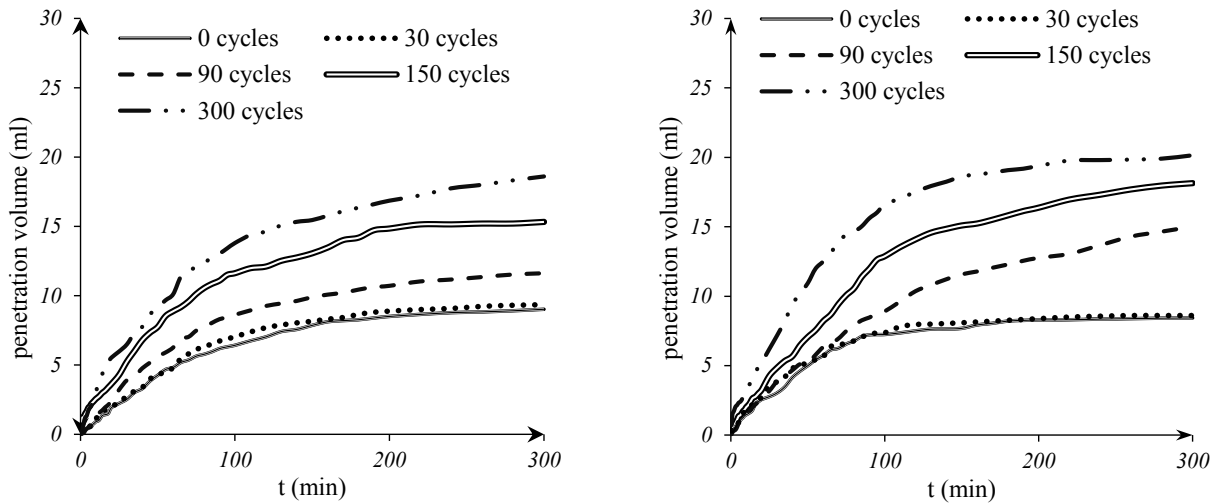
### ۳-۳-آزمایش "محفظه استوانه‌ای"

الف) نفوذپذیری نمونه تحت شرایط تغییر دما در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودارهای حجم نفوذ-زمان و کل حجم آب نفوذی طی ۵ ساعت از زمان آزمایش برای نمونه‌های تقویت با



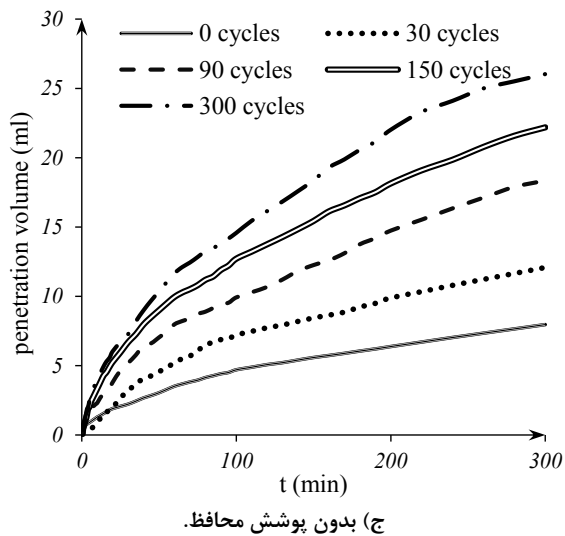
شکل ۱۲. حجم کل آب نفوذی در مدت ۵ ساعت تحت سیکل تغییر دما

Fig. 12. The total penetration volume for 5 hours under temperature change cycles.



(ب) پوشش ماسه سیمان حاوی چسب.

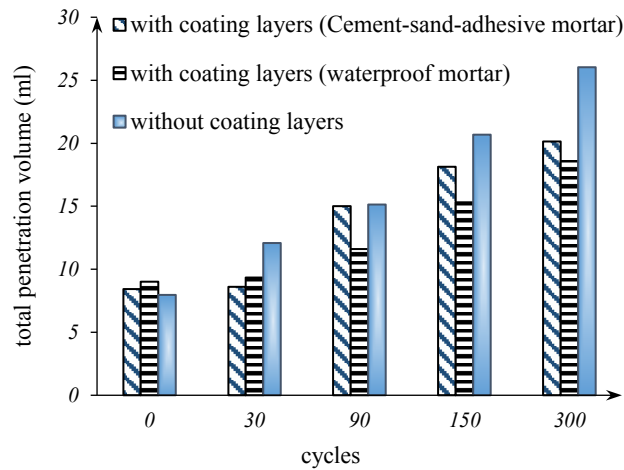
(الف) پوشش آب بند پایه اپوکسی.



(ج) بدون پوشش محافظ.

شکل ۱۳. حجم نفوذ-زمان تحت شرایط تر و خشک شدگی

Fig. 13. Penetration volume-time under wet-dry cycles (a) Epoxy based waterproof coating (b) Cement-sand coating with adhesive (c) without coating



شکل ۱۴. حجم کل آب نفوذی در مدت ۵ ساعت تحت سیکل تر و خشک  
 Fig. 14. The total penetration volume for ۵ hours under wet-dry cycles.

سیکل، میانگین نتایج ۳ نمونه می‌باشد.

با توجه به اینکه شیب نمودار حجم نفوذ (شکل ۱۱) بیانگر نرخ نفوذ است، در نمونه‌هایی که دارای پوشش محافظ می‌باشند، در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری نفوذ می‌کند. با گذشت بیشتر زمان از شروع آزمایش، به دلیل پر شدن منافذ موجود در پوشش‌های محافظ از آب، سرعت نفوذ کم شده و مقدار حجم نفوذ به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. در این نمونه‌ها کاهش شدید شیب نمودار حجم نفوذ که بیانگر نرخ نفوذ آب است در اکثر نمونه‌ها از زمان ۱۰۰ دقیقه از شروع آزمایش مشاهده شد. در نمونه‌هایی که بدون پوشش محافظ می‌باشند، مقدار کاهش سرعت نفوذ آب نسبتاً کمتر است.

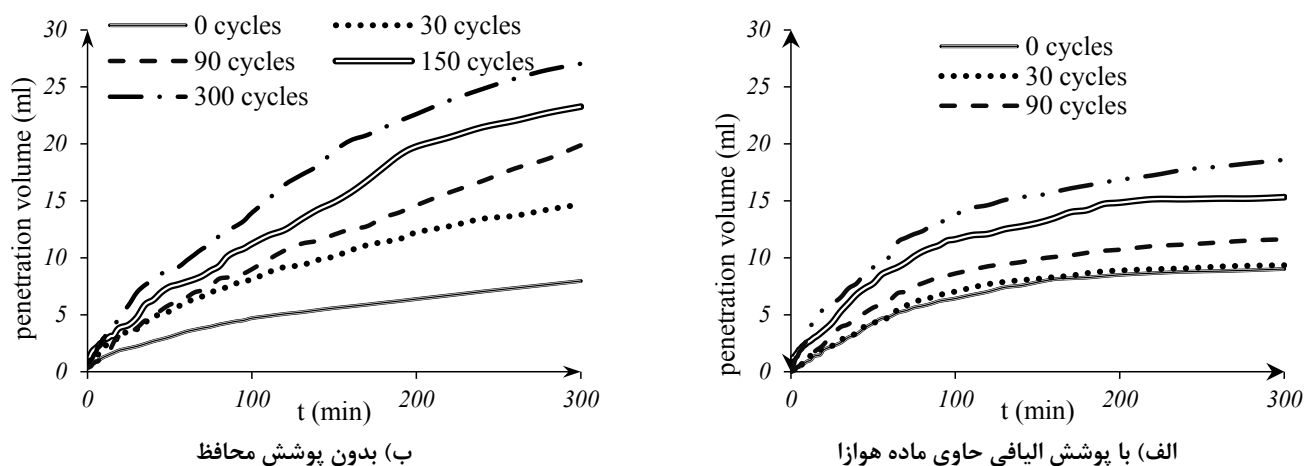
مطابق نتایج به دست آمده نفوذپذیری الیاف CFRP در برابر سیکل تغییر دما تا پایان سیکل ۹۰ به مقدار کمی افزایش یافته است این در حالیست که در سیکل ۱۵۰ و ۳۰۰ افزایش بیشتری داشته است. این به معنی این است که سیکل تغییر دما در طولانی مدت باعث کاهش دوام و عملکرد ورق CFRP می‌گردد. بنابراین پوشش محافظ باید در سیکل‌های پایانی به خوبی از ورق CFRP در برابر چرخه‌های تغییر دما محافظت کند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مقدار حجم آب نفوذی در سیکل ۱۵۰ و ۳۰۰ برای نمونه دارای پوشش محافظ کمتر از حالت بدون پوشش محافظ به دست آمده و استفاده از پوشش الیافی در شرایط تغییر دما موجب کاهش نفوذپذیری در سیکل‌های پایانی (سیکل ۱۵۰ و ۳۰۰) شده است.

ب) نفوذپذیری نمونه تحت شرایط تر و خشک شدگی

سرعت دقیق جذب رطوبت به عواملی هم چون میزان خلل و فرج، نوع الیاف، نوع رزین، جهت و ساختار الیاف، درجه حرارت، سطح تنش وارده و حضور ریزترک‌ها بستگی دارد. چنانچه الیاف به صورت طولانی مدت در معرض ورود آب قرار گیرد آسیب می‌بیند، زیرا حضور آب در سطح الیاف انرژی سطحی آن را کاهش می‌دهد و موجب رشد ترک خوردگی می‌گردد. به منظور محافظت از ورق CFRP در شرایط تر و خشک شدگی از دو نوع پوشش آب‌بند پایه اپوکسی و ماسه سیمان حاوی چسب استفاده شده است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ حجم نفوذ-زمان و کل حجم آب نفوذی طی ۵ ساعت از زمان آزمایش برای نمونه‌های تقویت شده با CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ تحت شرایط تر و خشک شدگی نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در هر سیکل، میانگین نتایج ۳ نمونه می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۳-ج مشاهده می‌شود، حجم آب نفوذی در نمونه تقویت شده با الیاف CFRP بدون پوشش محافظ تحت شرایط تر و خشک شدگی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. افزایش نفوذپذیری پس از اعمال سیکل‌های اولیه نمود بیشتری پیدا می‌کند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از پوشش‌های محافظ آب‌بند پایه اپوکسی و ملات ماسه سیمان حاوی چسب موجب کاهش حجم آب نفوذی در نمونه می‌شوند. مطابق با نمودار شکل ۱۴، استفاده از پوشش محافظ ماسه سیمان حاوی چسب موجب کاهش





شکل ۱۵. حجم نفوذ-زمان تحت شرایط یخ و ذوب یخ

Fig. 15. Penetration volume-time under freeze-thaw cycles (a) fiber coating with air entr. (b) Without coating

کاهش قابل ملاحظه‌ای نفوذپذیری نمونه تحت سیکل یخ و ذوب یخ به خصوص در سیکل‌های پایانی شده است. ماده هوازا با ایجاد حباب‌های تصادفی فضای کافی برای انبساط آب درون بتن ایجاد می‌کند و از فشار ایجاد شده ناشی از یخ و ذوب یخ درون بتن می‌کاهد. از این رو این پوشش دوام و عملکرد مطلوبی در شرایط یخ و ذوب یخ از خود نشان می‌دهد.

به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد و کارایی هر یک از پوشش‌های محافظ به کار رفته بر روی لایه CFRP، درصد افزایش یا کاهش حجم کل آب نفوذی در نمونه‌های دارای پوشش محافظ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ در شکل ۱۷ آورده شده است.

همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، حجم آب نفوذی در پایان ۵ ساعت از زمان آزمایش در نمونه با پوشش محافظ آب‌بند پایه اپوکسی در شرایط نرمال آزمایشگاهی (سیکل ۰) نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ ۶٪ بیشتر و در سیکل‌های ۳۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به ترتیب ۲۸٪، ۱٪، ۱۲٪ و ۲۲٪ کمتر به دست آمده است. این در حالیست که حجم آب نفوذی در نمونه با پوشش ماسه سیمان حاوی چسب تحت شرایط محیطی مشابه در سیکل ۰ به میزان ۱۳٪ نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ بیشتر و در سیکل‌های ۳۰، ۱۵۰، ۹۰ و ۳۰۰ به ترتیب ۲۲٪، ۲۳٪، ۲۵٪ و ۲۸٪ کاهش یافته است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که نفوذپذیری ورق CFRP در شرایط محیطی نرمال از نفوذپذیری ملات آب‌بند پایه اپوکسی و ماسه سیمان حاوی

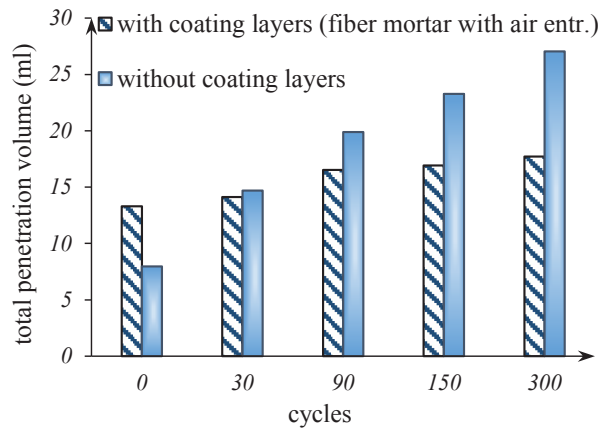
بیشتر نفوذپذیری شده است. حجم آب نفوذی در نمونه با این نوع پوشش به خصوص در سیکل‌های پایانی تر و خشک شدگی نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. این بدین معنی است که در حالی که سیکل تر و خشک شدگی موجب کاهش عملکرد و دوام لایه CFRP می‌شود، پوشش محافظ ماسه سیمان حاوی چسب ضمن حفاظت مناسب از لایه CFRP، کارکرد اولیه خود را نیز در برابر این نوع شرایط محیطی حفظ نموده است.

### ج) نفوذپذیری نمونه تحت شرایط یخ و ذوب یخ

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودارهای حجم نفوذ-زمان و کل حجم آب نفوذی طی ۵ ساعت از زمان آزمایش برای نمونه‌های تقویت شده با الیاف CFRP با و بدون پوشش محافظ، تحت شرایط یخ و ذوب یخ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در هر سیکل، میانگین نتایج ۳ نمونه می‌باشد.

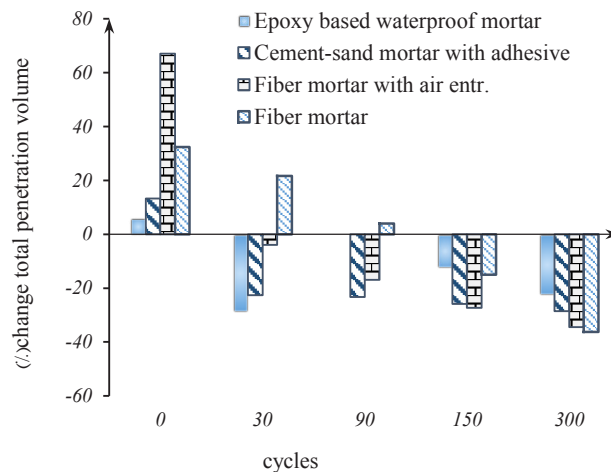
مطابق نتایج به دست آمده، سیکل یخ و ذوب یخ موجب افزایش قابل توجه نفوذپذیری در نمونه تقویت شده با CFRP بدون پوشش محافظ شده است، این در حالیست که پوشش الیافی حاوی ماده هوازا در شرایط یخ و ذوب یخ تاثیر قابل توجهی بر کاهش حجم آب نفوذی داشته است.

با توجه به کل حجم آب نفوذی در پایان زمان آزمایش (شکل ۱۶) می‌توان گفت استفاده از ماده هوازا در پوشش محافظ موجب



شکل ۱۶. حجم کل آب نفوذی در مدت ۵ ساعت تحت سیکل یخ و ذوب یخ

Fig. 16. The total penetration volume for 5 hours under freeze-thaw cycles



شکل ۱۷. تغییرات حجم کل آب نفوذی در مدت ۵ ساعت نسبت به نمونه بدون پوشش محافظ

Fig. 17. Changes in total penetrated volume of water in 5 hours compared with those belonging to specimens without protective coating

شرایط یخ و ذوب یخ به شدت موجب افزایش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش دوام و عملکرد ورق CFRP شده است. دوم آنکه افزودن مقدار مناسب از ماده هوازا در سیکل‌های یخ و ذوب یخ موجب کاهش قابل توجه نفوذپذیری نمونه می‌شود. بنابراین در شرایط یخ و ذوب یخ استفاده از ماده هوازا در ملات الیافی علاوه بر حفاظت از ورق CFRP عملکرد و دوام آن را نیز افزایش می‌دهد.

همان طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، حجم آب نفوذی در نمونه با پوشش الیافی تحت شرایط تغییر دما در سیکل‌های ۰، ۳۰، ۹۰ و ۳۰۰ به ترتیب ۰.۳۲٪، ۰.۲۱٪ و ۰.۴٪ بیشتر و در سیکل‌های

چسب کمتر است، اما زمانی که تحت شرایط محیطی حاد (سیکل تر و خشک شدگی) قرار می‌گیرد، به تدریج عملکرد مطلوب ورق CFRP از بین می‌رود، در چنین شرایطی استفاده از نوعی پوشش محافظ همچون ماسه سیمان حاوی چسب می‌تواند بسیار موثر واقع شود.

مطابق با نتایج به دست آمده میزان حجم آب نفوذی در نمونه با پوشش محافظ الیافی حاوی ماده هوازا تحت شرایط یخ و ذوب یخ در سیکل ۰ به میزان ۶۷٪ از نمونه بدون پوشش محافظ بیشتر و در سیکل‌های ۳۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ به میزان ۴٪، ۱۶٪، ۲۷٪ و ۳۴٪ کمتر است. از این موضوع دو نتیجه مهم به دست می‌آید. اول آنکه

به دست آمده است. همچنین مقاومت فشاری پوشش آب‌بند پایه اپوکسی پس از ۳۰۰ سیکل تر و خشک شدگی به طور قابل ملاحظه‌ای (۵۳٪) کاهش یافته است. از این رو پوشش ماسه سیمان حاوی چسب در شرایط تر و خشک شدگی مناسب‌تر از ملات آب‌بند پایه اپوکسی می‌باشد.

۵- نتایج حاکی از آن است که، حجم آب نفوذی در نمونه با پوشش الیافی تحت شرایط تغییر دما در سیکل‌های پایانی کمتر از نمونه بدون پوشش محافظ به دست آمده است. این نوع پوشش محافظ اگر چه در سیکل‌های ۰ تا ۹۰ تاثیر مطلوبی بر کاهش نفوذپذیری نمونه نداشته است اما در سیکل پایانی تغییرات دما (که سیکل تاثیرگذارتری بر کاهش دوام ورق CFRP به شمار می‌رود) موثر واقع شده است.

۶- افزودن ماده هوازا به پوشش الیافی موجب افزایش جذب آب مؤئینه و کاهش مقاومت فشاری تحت شرایط نرمال آزمایشگاهی می‌شود. در حالی که وجود هوازا در شرایط یخ و ذوب یخ موجب بهبود عملکرد و دوام ملات گردیده است. تغییرات جذب آب مؤئینه، نفوذپذیری و مقاومت فشاری این نوع ملات پس از ۳۰۰ سیکل یخ و ذوب یخ با وجود اثر تخریبی شدیدتر این شرایط نسبت به دیگر شرایط محیطی از دیگر پوشش‌های محافظ کمتر بود.

۷- بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان عملکرد پوشش الیافی را در شرایط تغییر دما، پوشش الیافی حاوی ماده هوازا را در شرایط یخ و ذوب یخ و ملات ماسه سیمان حاوی چسب را در شرایط تر و خشک شدگی مطلوب‌تر از عملکرد سایر پوشش‌ها دانست.

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

مساحت، $mm^2$	$A$
جذب مؤئینه، $gr/mm^2$	$C$
قرائت میکروکتر، $mm$	$h$
جرم نمونه پس از جذب، $gr$	$M_j$
جرم نمونه پس از عمل‌آوری، $gr$	$M_0$
نرخ نفوذ، $ml/min$	$Q$
ضریب جذب مؤئینه، $gr/mm^2 \cdot min^{0.5}$	$S$
زمان، $min$	$t$
حجم نفوذ، $ml$	$V$

## مراجع

- [1] B.N. Sharp, REINFORCED AND PRESTRESSED CONCRETE IN MARITIME STRUCTURES, Proceedings

پایانی ۱۵۰ و ۳۰۰ به میزان ۱۵٪ و ۳۶٪ کمتر از نمونه بدون پوشش محافظ به دست آمده است. طبق نتایج به دست آمده تغییرات دما در سیکل‌های ابتدایی تاثیر چندان زیادی بر کاهش دوام و عملکرد ورق CFRP نداشته و بیشتر در سیکل‌های پایانی موجب افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام آن می‌گردد. این نوع پوشش محافظ اگر چه در سیکل‌های ۰ تا ۹۰ تاثیر مطلوبی بر کاهش نفوذپذیری نمونه نداشته است، اما در سیکل پایانی که سیکل تاثیرگذارتری بر کاهش دوام ورق CFRP به شمار می‌رود موثر واقع شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی دوام و نفوذپذیری ورق CFRP تقویت کننده‌ی بتن و پوشش‌های محافظ اعمال شده بر این ورق‌ها در شرایط محیطی حاد پرداخته شد. آزمایشات انجام شده در این تحقیق شامل آزمایش "محفظه استوانه‌ای" به منظور تعیین نفوذپذیری نمونه‌های بتنی تقویت شده با ورق CFRP در دو حالت با و بدون پوشش محافظ، آزمایش تعیین جذب آب مؤئینه و آزمایش مقاومت فشاری ملات (پوشش‌های محافظ) می‌باشد. پیش از انجام این آزمایش‌ها، نمونه‌های ساخته شده تحت سیکل‌های مختلف تغییر دما، تر و خشک شدگی و یخ و ذوب یخ قرار داده شدند. با توجه به مطالب ارائه شده، می‌توان نتایج اصلی را به شرح ذیل بیان نمود:

۱- در نمونه تقویت شده با ورق CFRP حجم نفوذ آب تحت شرایط تغییر دما کمتر از حالت تر و خشک و یخ و ذوب یخ بوده است. بنابراین تغییرات دما کمترین اثر را بر ورق CFRP دارد.

۲- در نمونه تقویت شده با ورق CFRP حجم نفوذ آب تحت شرایط یخ و ذوب یخ بیشتر از حالت تر و خشک و تغییر دما بوده است. این مطلب بیانگر این است که عامل یخ و ذوب یخ بیشترین اثر را بر عملکرد ورق CFRP دارد.

۳- استفاده از پوشش محافظ ماسه سیمان حاوی چسب بر روی ورق CFRP پس از ۳۰۰ سیکل تر و خشک شدگی به میزان قابل توجهی از نفوذپذیری نمونه می‌کاهد.

۴- اگر چه نفوذپذیری و جذب آب مؤئینه پوشش ماسه سیمان حاوی چسب در شرایط نرمال آزمایشگاهی نسبت به پوشش آب‌بند پایه اپوکسی بیشتر است، اما پس از اعمال ۳۰۰ سیکل تر و خشک شدگی نفوذپذیری آن نسبت به پوشش آب‌بند پایه اپوکسی کمتر

- of concrete specimens strengthened with FRP sheets to the penetration of chloride ions, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1) (2010) 141 %@ 1319-8025.
- [13] P. Böer, L. Holliday, T.H.K. Kang, Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: a review, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 360-370 %@ 0950-0618.
- [14] R. Gopalan, B.R. Somashekar, B. Dattaguru, Environmental effects on fibre—Polymer composites, *Polymer degradation and stability*, 24(4) (1989) 361-371 %@ 0141-3910.
- [15] L.C. Bank, T.R. Gentry, A. Barkatt, Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 14(6) (1995) 559-587 %@ 0731-6844.
- [16] M.A.G. Silva, B.S. da Fonseca, H. Biscaia, On estimates of durability of FRP based on accelerated tests, *Composite Structures*, 116 (2014) 377-387 %@ 0263-8223.
- [17] R. Cusson, Y. Xi, The behavior of fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates, in, *University of Colorado*, 2002.
- [18] N. Banthia, A. Biparva, S. Mindess, Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Research*, 35(9) (2005) 1651-1655 %@ 0008-8846.
- [19] M. Naderi, Registration of Patent in Companies and industrial property Office, "Determination of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method.", in, Reg, 2010.
- [20] M. Naderi, A. Kaboudan, Cylindrical Chamber: A New In Situ Method for Measuring Permeability of Concrete with and without Admixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3 %@ 0090-3973) (2020).
- [21] B.S. En, 480-11. Admixtures for concrete, mortar and grout-test methods-part 11: determination of air void characteristics in hardened concrete, London: British Standards Institution, (2005).
- [22] F.H. Wittmann, A.D.A. Wittmann, P.G. Wang, Capillary absorption of integral water repellent and surface of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 116(3) (1996) 449-469 %@ 1751-7702.
- [2] F.S. Rostásy, FRP Tensile Elements For Prestressed Concrete--State of the art, Potentials and limits, Special Publication, 138 (1993) 347-366.
- [3] F. Micelli, J.J. Myers, S. Murthy, Performance of FRP confined concrete subjected to accelerated environmental conditioning, in, 2002, pp. 87-98.
- [4] X. Li, Q. Xu, S. Chen, An experimental and numerical study on water permeability of concrete, *Construction and building materials*, 105 (2016) 503-510 %@ 0950-0618.
- [5] A.C.I. Ct, 13.(2013)., ACI Concrete Terminology, ACI STANDARD, First Printing January, (2013).
- [6] M. Dashtibadfarid, M. Afrasiabi, Low-Permeability Concrete: Water-to-Cement Ratio Optimization for Designing Drinking Water Reservoirs, *Int. J. Innov. Eng. Sci*, 2 (2017) 20-24.
- [7] S. Ahmad, A.K. Azad, K.F. Loughlin, Effect of the key mixture parameters on tortuosity and permeability of concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(3) (2012) 86-94 %@ 1347-3913.
- [8] T.C. Fu, W. Yeih, J.J. Chang, R. Huang, The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 %@ 1687-8434 (2014).
- [9] Z. Yu, C. Ni, M. Tang, X. Shen, Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash, *Construction and building materials*, 175 (2018) 458-466 %@ 0950-0618.
- [10] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad, 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 (2017) 292-311 %@ 0950-0618.
- [11] A. Belarbi, S.-W. Bae, An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets, *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6) (2007) 674-684 %@ 1359-8368.
- [12] A. Gharachorlou, A. Akbar Ramezani-pour, Resistance

- temperature, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 1926-1934 %@ 0950-0618.
- [27] P. Zhang, D. Li, Y. Qiao, S. Zhang, C. Sun, T. Zhao, Effect of air entrainment on the mechanical properties, chloride migration, and microstructure of ordinary concrete and fly ash concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10) (2018) 04018265 %@ 04010899-04011561.
- [28] M. Pigeon, R. Pleau, M. Azzabi, N. Banthia, Durability of microfiber-reinforced mortars, *Cement and Concrete Research*, 26(4) (1996) 601-609 %@ 0008-8846.
- [29] D. Niu, L. Jiang, M. Bai, Y. Miao, Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition, *Materials & Design*, 44 (2013) 267-273 %@ 0261-3069.
- impregnated concrete, *Restoration of Buildings and Monuments*, 20(4) (2014) 281-290 %@ 1864-7022.
- [23] C. Hall, T.K.-M. Tse, Water movement in porous building materials—VII. The sorptivity of mortars, *Building and Environment*, 21(2) (1986) 113-118 %@ 0360-1323.
- [24] A. Astm, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), *Annual Book of ASTM Standards Annual Book of ASTM Standards*, 4(1) (2013) 1-9.
- [25] C. Astm, 33, 2008 “Standard Specification for Concrete Aggregates”, West Conshohocken, USA, (2008).
- [26] P. Pliya, A.L. Beaucour, A. Noumowé, Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*R. Rahbari , M. Naderi, Assessing the compressive strength and permeability of protective coating layers applied to CFRP sheets, under harsh environmental conditions, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4379-4396.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.18324.6836](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18324.6836)



