

EXTENDED ABSTRACT

Estimation of Compressive Strength and Amount of Water Penetration in Concretes with Additives Using Friction Transfer Methods and Cylindrical Chamber

Mahmood Naderi^a, Ali Saberi Varzaneh^{b,*}, Majid Parhishkari^c

^a Professor, Technical and Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^b Ph.D., Technical and Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^c Ph.D. Student, Technical and Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 24 February 2023; **Reviewed:** 08 June 2023; **Accepted:** 18 July 2023

Keywords:

In-situ methods, Mechanical characteristics, Additives, Concrete.

1. Introduction

Today, in-situ tests that are used to measure the penetration volume and mechanical characteristics of concretes have few capabilities. Therefore, methods that can directly measure the compressive strength and permeability of concrete with little damage are needed. Also, the effect of acute conditions on new materials that are widely used in Iran today to reduce the permeability of concrete should be investigated. In order to measure the permeability and depth of water penetration into concrete according to standards, it is necessary to break the sample, so in this research, a new cylindrical chamber method is used to measure the depth. Water penetration (which does not require breaking the concrete) has been used. Also, the compressive strength of concrete has been measured with the new friction transfer test (this test directly measures the compressive strength with high accuracy without breaking the concrete). Ordinary concretes, containing fibrous micro silica and micro silica, which are widely used in Iran, were used. Concretes with different strength and under freezing and melting conditions were tested with different cycles. According to the obtained results, the penetration depth and compressive strength of concrete can be measured using linear equations without the need to break the sample and with a high correlation coefficient. Also, the mentioned additive reduced the infiltration volume by about 50%. The negative effects of ice and melting are more in the beginning, but with the passage of time, the negative effects decrease. Thus, 70% of the increase in infiltrated water occurred in the first 50 cycles.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The granulation chart of the aggregates used in this research to make concrete is shown in the Fig. 1

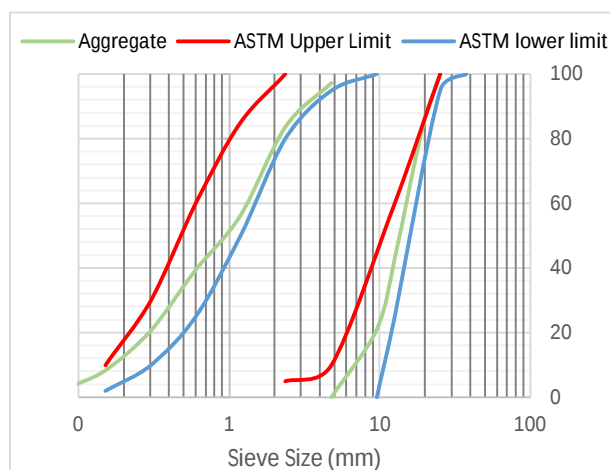


Fig. 1. The granulation chart of the aggregates

New method of cylindrical chamber

Fig. 2 shows the device of this experiment. This device has very simple equipment that can be built easily. This device has the ability to accurately measure the volume of water infiltrating concrete.



Fig. 2. New method of cylindrical chamber

New method of friction transfer

The friction transfer test also has a very simple and cheap device. This method can accurately measure the compressive strength of concrete in any condition (Fig. 2).



Fig. 3. New method of friction transfer

2.2. FE modeling

In order to compare the laboratory results with the results of the finite element method, the friction transfer method was modeled using the finite element method (Fig. 4).

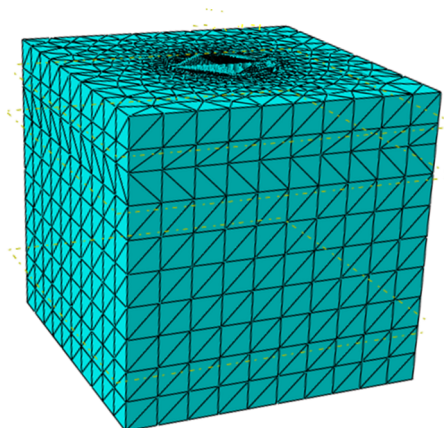


Fig. 4. Meshing

3. Results and discussion

3.1. Examining the correlation chart

By plotting the results of the test of the cylindrical chamber and the penetration depth of the concretes, the calibration diagram of Fig. 5 is obtained. Therefore, the penetration depth of concrete can be measured by the above test.

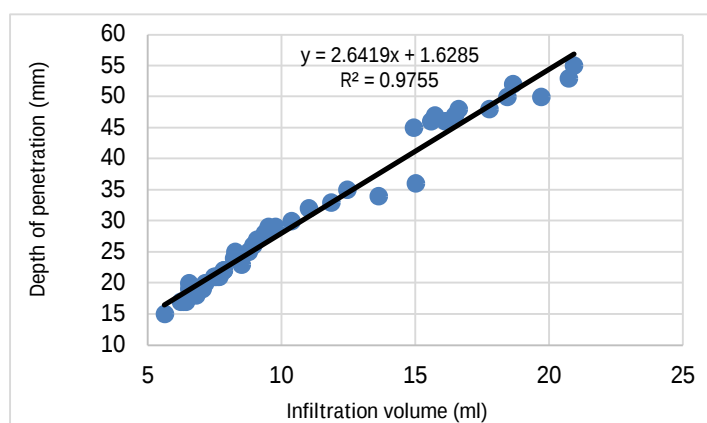


Fig. 5. the calibration diagram

4. Conclusions

According to the obtained results, the penetration depth and compressive strength of concrete can be measured using linear equations without the need to break the sample and with a high correlation coefficient. Also, the mentioned additive reduced the infiltration volume by about 50%. The negative effects of ice and melting are more in the beginning, but with the passage of time, the negative effects decrease. Thus, 70% of the increase in infiltrated water occurred in the first 50 cycles.

تخمین مقاومت فشاری و مقدار نفوذ آب در بتن‌های دارای مواد افزودنی به روش‌های انتقال اصطکاک و محفظه استوانه‌ای

محمود نادری¹، علی صابری ورزنه^{2*}، مجید پرهیزکاری³

¹ استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین

² دکترای سازه از دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین

³ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین

دریافت: 1401/4/5، بازنگری: 1402/3/18، پذیرش: 1402/12/27، نشر آنلاین: 1402/12/27

چکیده

امروزه آزمون‌هایی که برای اندازه‌گیری حجم نفوذ و تخمین مشخصات مکانیکی بتن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای قابلیت‌های اندکی می‌باشند. لذا روش‌هایی که بتواند با آسیب اندک، مقدار مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن را به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری یا ارزیابی نماید مورد نیاز می‌باشد. همچنین می‌بایست تأثیر شرایط حاد محیطی بر مصالح جدیدی که امروزه برای کاهش نفوذپذیری بتن به‌وفور در ایران استفاده می‌گردد، مورد بررسی قرار گیرد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری و عمق نفوذ آب در بتن طبق استانداردهای BS-EN-12390-8 و DIN-1048-5، لازم به شکستن نمونه می‌باشد. لذا در این تحقیق از روش‌های نوین محفظه استوانه‌ای و انتقال اصطکاک به‌ترتیب جهت اندازه‌گیری عمق نفوذ آب و ارزیابی مقاومت فشاری بتن استفاده شده است. از مزیت‌های روش‌های فوق، عدم نیاز به شکستن بتن می‌باشد. مواد افزودنی استفاده شده در بتن‌ها عبارتند از میکروسیلیس الیاف‌دار (Fiber Reinforced Microsilica) و میکروسیلیس که در ایران به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. بتن‌هایی با مقاومت 15، 20، 25، 30، 35، 40، 45 و 50 مگاپاسکال استفاده گردید که تعدادی از آن‌ها تحت شرایط یخ و ذوب با تعداد چرخه‌های 0، 50، 100 و 150 سیکل ارزیابی گردیدند. نتایج حاصله بیانگر این می‌باشد که با استفاده از معادلات خطی با ضریب همبستگی مناسب، می‌توان مقدار عمق نفوذ آب در بتن و مقدار مقاومت فشاری بتن را بدون نیاز به شکستن نمونه اندازه‌گیری و ارزیابی نمود. افزودن میکروسیلیس الیاف‌دار نیز باعث کاهش مقدار نفوذ آب در بتن به مقدار حدود 50 درصد گردیده است. همچنین تأثیرات چرخه‌های یخ‌زدن و ذوب شدن با گذشت زمان بر نفوذپذیری کاهش یافته است به‌گونه‌ای که 70 درصد از افزایش آب نفوذ کرده در بتن در 50 سیکل ابتدایی رخ داده است. در انتها برای صحت‌سنجی آزمون انتقال اصطکاک، از مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: بتن، مقاومت فشاری، نفوذپذیری، روش‌های درجا.

1- مقدمه

(2015، Ozbakaloglu و Afroughsabet، 2017).

از طرفی آزمون‌هایی که بدون تخریب بتن، مقدار مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن را چه به‌صورت آزمایشگاهی و یا درجا و در هر شرایط دمایی و رطوبتی اندازه‌گیری یا ارزیابی نماید مورد نیاز است. مقدار نفوذ آب به بتن به ماهیت شیمیایی و فیزیکی بتن مربوط می‌باشد (Akkaya و Çağatay، 2021). مقدار نفوذپذیری بتن، مهم‌ترین عامل جهت بررسی دوام و پایداری سازه‌های بتنی می‌باشد (Kaboudan و همکاران، 2021).

امروزه هر سازه‌ای برای کاربری مشخصی طراحی می‌گردد اما طراحی باید به گونه‌ای باشد که با گذشت زمان، بتن دچار افت بیش از حد در دوام و مقاومت نگردد. همچنین در برابر عوامل مخرب و بارهای اعمالی دارای عملکرد مناسبی باشد. در میان عوامل دخیل در مشخصات مکانیکی و دوام بتن، همواره ارزیابی نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن دارای اهمیت زیادی می‌باشد (Mardani-Aghabaglou و همکاران، 2015؛ Zareei و همکاران،



باعث تأثیرات منفی روی مشخصات مکانیکی بتن گردد (Dharan و Lal، 2016؛ Kene و همکاران، 2006).

امروزه استفاده از آزمون‌هایی که بتواند بدون آسیب جدی به بتن، مقدار نفوذپذیری و مشخصات مکانیکی بتن را چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت درجا و در هر شرایط دمایی و رطوبتی و بدون ربط دادن به عامل دیگری اندازه‌گیری یا ارزیابی نماید مورد توجه زیادی قرار گرفته است. به عنوان مثال برای اندازه‌گیری مقدار عمق نفوذ آب به داخل بتن با استفاده از استانداردهای BS-EN-12390-8 و DIN-1048-5 می‌بایست پس از انجام آزمایش، نمونه توسط جک بتن‌شکن شکسته شده و مقدار نفوذ آب اندازه‌گیری گردد. از آزمون‌های درجا که به صورت دقیق و بدون تخریب بتن، توانایی ارزیابی مقاومت فشاری و اندازه‌گیری عمق نفوذ بتن را دارند به ترتیب عبارتند از آزمون انتقال اصطکاک (Naderi، 2005) و آزمون محفظه استوانه‌ای (Naderi، 2010).

در تحقیقات قبلی، از روش‌های مذکور برای پژوهش‌های بسیاری استفاده شده است. در تحقیقی از آزمون انتقال اصطکاک برای تخمین مقاومت فشاری ملات‌های مسلح به الیاف، ملات‌های اصلاح شده با پلیمر و بتن معمولی استفاده شده است که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بالای 90 درصد بین این آزمون و دیگر آزمون‌های استاندارد وجود دارد (Saberi و Naderi، 2021؛ a-2021). همچنین از آزمون انتقال اصطکاک برای بررسی مقاومت برشی چسبندگی (Naderi، 2005؛ Naderi و Ghodousian، 2012؛ Saberi و Naderi، 2022)، مقاومت آسفالت (Naderi، 2006) و مقاومت فشاری سنگ‌ها (Naderi، 2011) استفاده شده است. همچنین در خصوص آزمون محفظه استوانه‌ای، در تحقیقی مشاهده گردیده است که استفاده از مواد پوزولانی باعث کاهش مقدار آب نفوذ کرده به بتن می‌گردد (Naderi و همکاران، 2021).

در تحقیقی دیگر با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای روی بتن با سنگ‌دانه‌های مختلف مشاهده گردیده است که نفوذپذیری بتن حاوی سنگ تراورتن بسیار زیاد می‌باشد (Naderi و همکاران، 2018). همچنین از این آزمون برای بررسی مقدار نفوذپذیری بتن تحت تأثیر مشتقات نفتی نیز استفاده شده است (Yuan و همکاران، 2023).

در این تحقیق، برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌ها از آزمون انتقال اصطکاک استفاده شده است. این آزمون دارای دستگاهی ساده، ارزان و در دسترس بوده و در آب و خشکی و در دماهای مختلف، مقاومت فشاری بتن را به صورت مستقیم ارزیابی می‌نماید. همچنین برای اندازه‌گیری مقدار عمق نفوذ بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی افزودنی، از دستگاه محفظه استوانه‌ای استفاده شده است. عدم نیاز به شکستن نمونه و دقت مناسب در ارزیابی مقاومت فشاری و نفوذپذیری از جمله مزایای این روش است. همچنین تأثیر

از جمله عواملی که در نفوذپذیری بتن تأثیرگذار می‌باشند عبارتند از مقاومت فشاری و نسبت‌های مختلف آب به سیمان در بتن (Afrasiabi و Dashtibadfarid، 2017)، مقدار و نوع سنگ - دانه‌ها (Kong و Ge، 2015؛ Liu و همکاران، 2018)، افزودنی‌های مختلف (Amadi و Amadi-Oparaali، 2018)، نوع و دمای عمل - آوری (Sakai و همکاران، 2017)، جهت نیروها و تنش‌های اعمالی (Xue و همکاران، 2021) و مقاومت ناحیه انتقال خمیر سیمان و جزئیات ریزساختاری آن اشاره نمود (Naderi و Kaboudan، 2021؛ Liang و همکاران، 2020؛ Zhang و همکاران، 2020).

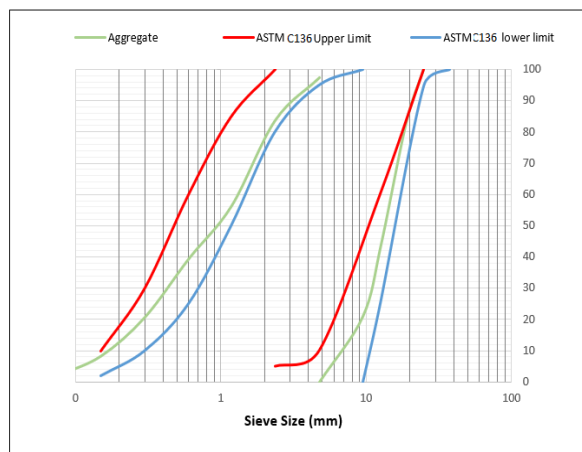
اگر بتن تحت شرایط حاد محیطی و رطوبتی قرار گیرد، می‌تواند تأثیرات منفی زیادی روی مشخصات بتن داشته باشد. یکی از عواملی که در این خصوص تأثیر زیادی بر کاهش دوام و پایداری بتن دارد، قرار گرفتن بتن تحت سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن می‌باشد. سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن باعث می‌شوند که آب موجود در داخل بتن دچار یخ‌زدگی شده و با اعمال تنش‌های مضاعف به بتن، سبب آسیب رساندن به آن می‌گردد. با توجه به این‌که آب به راحتی در منافذ ریز بتن نفوذ نموده و توانایی حل نمودن بسیاری از مواد معدنی و آلی را در خود دارد لذا با نفوذ در بتن، باعث ایجاد تخریب در داخل بتن می‌گردد (Houaria و همکاران، 2017).

قرارگیری بتن تحت شرایط حاد محیطی علاوه بر این‌که موجب افزایش ترک‌های مویی در داخل بتن می‌گردد، باعث کاهش مقاومت و دوام بتن نیز می‌شود (Boyd و Leone، 2019؛ Lee و همکاران، 2021)، البته تحقیقات نشان داده است که با افزایش مقاومت فشاری، تأثیرات منفی سیکل‌های یخ و ذوب بر بتن کاهش می‌یابد (Ahmed و Etman، 2018). یکی دیگر از اثرات منفی شرایط حاد محیطی بر بتن، کاهش مقدار مقاومت چسبندگی بتن به مصالح مقاوم‌سازی از جمله CFRP می‌باشد (Naderi و Smeali Zadeh، 2016؛ Cao و همکاران، 2021).

افزودن مواد کاهنده نفوذ، مانند میکروسیلیس یا مسلح نمودن بتن به الیاف می‌تواند باعث کاهش اثرات منفی شرایط حاد محیطی بر دوام و مقاومت بتن گردد. تحقیقات نشان داده است که با افزودن الیاف به بتن، رفتار بتن و همچنین نمودار تنش - کرنش آن بهبود یافته و همچنین باعث جلوگیری از بازشدگی بیش از حد ترک‌ها در داخل بتن می‌گردد (Alsadey و Salem، 2016؛ Mesbah و Buyle-Bodin، 1999؛ Naderi و Saberi Varzaneh، 2020).

در تحقیقات دیگری مشاهده شده است که مسلح نمودن بتن به الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌گردد (Fasihi و Sadrmmomtazi، 2010؛ Salih و Al-Azaawee، 2008). البته مقدار مصرف الیاف در بتن برابر 0/3 درصد حجم بتن بوده و استفاده بیش از حد الیاف حتی می‌تواند

بر اساس استاندارد ASTM C494 و همچنین توصیه شرکت تولیدکننده، مقدار مصرف ژل میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس به ترتیب برابر 6 و 10 درصد وزنی سیمان مصرفی در نمونه‌ها می‌باشد. چسب دوجزئی نیز دارای رنگ طوسی، مقاومت فشاری 70 مگاپاسکال، مقاومت برشی 15 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته 12750 مگاپاسکال می‌باشد. از استانداردهای ASTM C136، ASTM C127 و ASTM C128 برای دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها و میزان جذب آب، شن و ماسه استفاده گردید. وزن مخصوص شن و ماسه به ترتیب برابر 2582 و 2463 کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار جذب آب نیز به ترتیب برابر 2 و 2/5 درصد به دست آمد. مدول نرمی ماسه نیز برابر 2/9 تعیین گردید. در شکل (2) نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها قابل مشاهده است.



شکل 2- نمودار دانه‌بندی

2-2 نحوه انجام آزمایش‌ها

2-2-1- آزمایش محفظه استوانه‌ای

مطابق شکل (3-الف)، دستگاه آزمایش محفظه استوانه‌ای از یک دسته اعمال فشار، اندیکاتور، فشارسنج، صفحه فلزی، شیر ورودی آب و شیر تخلیه هوا تشکیل شده است. برای انجام آزمون ابتدا مطابق شکل (3-ب) صفحه دایروی فلزی به کمک چسب مخصوص روی بتن چسبانده شده و سپس دستگاه آزمایش روی صفحه فولادی تثبیت می‌گردد (شکل 3-ج). در ادامه محفظه دستگاه پر از آب شده و عمل هواگیری انجام می‌شود. سپس با چرخاندن اهرم، فشار مورد نیاز تأمین شده که توسط فشارسنج عقربه‌ای قابل مشاهده است. حجم نفوذ آب در بتن، با ثبت مقادیر خوانده شده از میکرومتر عقربه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. مقدار حجم آب نفوذ کرده در بتن و نرخ نفوذ آب مطابق رابطه‌های (1) و (2) قابل محاسبه می‌باشد.

$$V=h \times A$$

(1)

افزودنی‌های الیافدار و میکروسیلیس بر کاهش اثرات مخربی مانند سیکل‌های یخ و ذوب نیز بر دوام بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

2- فعالیت‌های آزمایشگاهی

2-1- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی شامل آب شرب، چسب دوجزئی، سیمان پرتلند تپ 2، الیاف پلی‌پروپیلن، ژل میکروسیلیس الیافدار، میکروسیلیس و فوق روان‌کننده از نوع پلی‌کربسیلات بوده است. ژل میکروسیلیس الیافدار حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، فیلر معدنی، روان‌کننده پلیمری و میکروسیلیس می‌باشد. این ماده به صورت دوغاب غلیظ، دارای رنگ خاکستری تیره و وزن مخصوص 1/35 گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. در شکل (1) نمایی از ژل میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس قابل مشاهده است. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس نیز در جدول (1) ارائه شده است.

جدول 1- مشخصات شیمیایی میکروسیلیس (درصد)

درصد وزنی	نوع	درصد وزنی	نوع
0/37	Fe ₂ O ₃	1/01	K ₂ O
0/50	SiC	0/30	C
0/97	MgO	0/10	SO ₃
0/31	Na ₂ O	1/32	Al ₂ O ₃
93/60	SiO ₂	0/49	CaO



(الف)



(ب)

شکل 1- نمایی از مواد افزودنی: الف) ژل میکروسیلیس،

ب) میکروسیلیس

برای اندازه‌گیری مقدار عمق نفوذ آب به داخل بتن، ابتدا مطابق شکل (4-الف) نمونه به دو قسمت تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از خطکش یا کولیس مقدار عمق نفوذ به داخل بتن ثبت می‌گردد (شکل (4-ب)).



(الف)



(ب)

شکل 4- اندازه‌گیری عمق نفوذ: الف) نمونه دومین شده،
ب) اندازه‌گیری مقدار خیس‌شدگی

البته در تحقیقات قبلی، برای صحت‌سنجی این روش، مقادیر حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای با نتایج حاصل از روش BS EN 12390-8 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصله بیانگر دقت بالای این آزمون در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن می‌باشد (Naderi و Kaboudan, 2020). در جدول (2) برخی مزیت‌های آزمون محفظه استوانه‌ای نسبت به استاندارد BS EN 12390-8 قابل مشاهده است.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

در معادلات مذکور، V حجم نفوذ آب (mm^3)، A سطح اعمال فشار (mm^2)، h قرائت میکرومتر (mm)، t زمان (s) و Q نرخ نفوذ آب (mm^3/s) می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 3- تست محفظه استوانه‌ای: الف) شکل شماتیک دستگاه،
ب) چسباندن صفحات زیرسری، ج) تثبیت دستگاه روی صفحات

جدول 2- برخی مزیت‌های آزمون محفظه استوانه‌ای نسبت به استاندارد BS EN 12390-8 (Naderi و Kaboudan, 2020)

مزیت‌ها	آزمون محفظه استوانه‌ای	آزمون BS	در خصوص BS EN 12390-8
توانایی انجام آزمون به صورت درجا	✓	×	تجهیزات آزمون BS حجیم و قابل حمل نیستند.
مقرون به صرفه بودن	✓	×	تجهیزات آزمون BS گران است.
قابلیت تکرار آزمون	✓	×	نمونه باید به دو نیم تقسیم شود تا عمق نفوذ بر اساس دستورالعمل‌های آزمون BS اندازه‌گیری شود.
قابل حمل بودن دستگاه	✓	×	تجهیزات آزمون BS حجیم و قابل حمل نیستند.
انجام آزمایش به صورت نیمه مخرب	✓	×	نمونه باید بر اساس دستورالعمل‌های آزمون BS به دو نیم تقسیم شود.
عدم محدودیت در ابعاد نمونه آزمایشی	✓	×	نمونه باید بر اساس دستورالعمل آزمون BS در قالبی با ابعاد مشخص قرار گیرد.
توانایی انجام آزمایش در مکان‌هایی که امکان نمونه‌گیری وجود ندارد	✓	×	تجهیزات آزمون BS بسیار حجیم است.
امکان انجام تست بر روی هر سطح شیبدار	✓	×	تجهیزات آزمون BS بسیار حجیم است.

2-2-2- روش "انتقال اصطکاک"

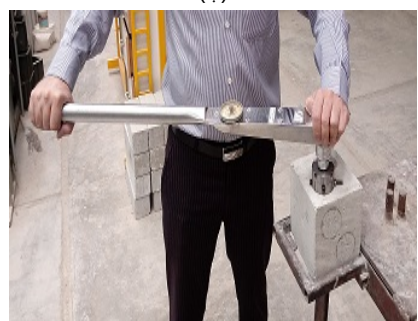
این آزمون از یک دستگاه فلزی به قطر و ارتفاع 5 و 2/5 سانتی‌متر و یک ترک‌متر ساده تشکیل شده است. برای انجام آزمون ابتدا یک مغزه جزئی به قطر 5 و ارتفاع 2/5 سانتی‌متر روی بتن ایجاد می‌شود (شکل (5-الف)). سپس دستگاه فلزی با پیچاندن پیچ‌ها، روی مغزه تثبیت شده (شکل (5-ب)) و توسط یک ترک‌متر ساده، تا لحظه شکست مغزه، ممان پیچشی وارد می‌گردد (شکل (5-ج)). تنش برشی وارد شده به مغزه دارای رابطه مستقیم با فاصله از مرکز می‌باشد. طبق شکل دایره موهر، تنش‌های اصلی فشاری و کششی با افق زاویه 45 درجه ساخته و مطابق شکل (5-د)، شکست در این حالت عمود بر راستای کششی و با زاویه 45 درجه رخ می‌دهد. مقدار حداکثر تنش برشی ایجاد شده تحت اثر پیچش عبارت است از (رابطه (3)):

$$\tau_{E-max} = \frac{Tr}{J}, j = \frac{\pi r^4}{2} \rightarrow \tau_{E-max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (3)$$

در معادله فوق، T مقدار ممان پیچشی (N.mm)، τ مقدار مقاومت برشی (MPa)، r شعاع (mm) و J ممان قطبی دوم سطح (mm⁴) می‌باشد.



(ب)



(ج)



(د)



(الف)

شکل 5- آزمون انتقال اصطکاک: (الف) کرگیری بتن، (ب) تثبیت دستگاه روی نمونه، (ج) اعمال لنگر پیچشی، (د) نمونه تست شده

3-2- روش تحقیق

ابتدا، نمونه‌های بتنی مکعبی با ابعاد 15 سانتی‌متر و رده‌های مقاومتی 15، 20، 25، 30، 35، 40، 45 و 50 مگاپاسکال مطابق طرح مخلوط نشان داده شده در جدول (3) (ACI 211.1، 1997) تهیه گردید. از هر طرح مخلوط تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام آزمایش نفوذپذیری، بتن با رده‌های مقاومتی 25، 30، 35 و 40 مگاپاسکال به صورت بدون افزودنی، حاوی افزودنی میکروسیلیس الیاف‌دار و حاوی افزودنی میکروسیلیس تهیه شدند. سپس در چرخه‌های یخ و ذوب با تعداد 0، 50، 100 و 150 سیکل قرار گرفتند. نمونه‌های بتنی تحت عمل‌آوری داخل آب آهک‌دار قرار گرفته و در سن 90 روز مورد

آزمایش قرار گرفتند. در ادامه با استفاده از آزمون محفظه استوانه‌ای مقدار نفوذپذیری آن‌ها اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری مقدار نفوذپذیری، نمونه‌ها به دو نیم تقسیم شدند و مقدار عمق نفوذ نیز اندازه‌گیری شد. در انتها نمودار کالیبراسیون خطی جهت تبدیل نتایج به دست آمده از آزمون محفظه استوانه‌ای به عمق نفوذ بتن رسم گردید. برای اعمال سیکل‌ها از استاندارد ASTM C666 استفاده گردید. طبق روش ذکر شده در استاندارد ASTM C666، ابتدا بتن به مدت 4 ساعت در دمای 18- درجه سلسیوس باید قرار داده شود. برای این کار می‌بایست از یخچال مخصوص که دارای درجه‌بندی دقیق می‌باشد استفاده نمود. سپس به مدت 4 ساعت در دمای 4/5+ درجه سلسیوس قرار گیرد.

جدول 3- طرح مخلوط بتن‌ها

فوق روان‌کننده ($\frac{Kg}{m^3}$)	ماسه ($\frac{Kg}{m^3}$)	شن ($\frac{Kg}{m^3}$)	نسبت آب به سیمان	سیمان ($\frac{Kg}{m^3}$)	آب ($\frac{Kg}{m^3}$)	رده مقاومتی (MPa)
0	900	716	0/67	327	220	C15
0	889	708	0/61	356	215	C20
0	880	700	0/55	382	212	C25
0	865	688	0/49	416	206	C30
1/17	862	686	0/45	441	198	C35
1/61	852	676	0/41	476	195	C40
2/13	839	668	0/37	517	191	C45
2/63	835	663	0/35	534	187	C50

برای انجام آزمون انتقال اصطکاک نیز ابتدا تعدادی از نمونه‌ها تحت آزمون انتقال اصطکاک قرار گرفتند و سپس تعدادی دیگر از نمونه‌ها با همان مشخصات در زیر جک بتن‌شکن قرار گرفتند. در انتها نمودار کالیبراسیون خطی جهت تبدیل نتایج به دست آمده از آزمون انتقال اصطکاک به مقاومت فشاری رسم گردید. پس از این می‌توان بدون شکستن نمونه و تنها با استفاده از روش انتقال اصطکاک و نمودار کالیبراسیون مذکور، مقدار مقاومت فشاری را با دقت بالا ارزیابی نمود.

3- بحث و بررسی نتایج

3-1- نفوذپذیری

3-1-1- تأثیر شرایط حاد محیطی بر حجم نفوذ آب به بتن حاوی مواد مضاف

در شکل (6) حجم نفوذ آب به داخل بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی میکروسیلیس الیاف‌دار و میکروسیلیس نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (6-الف) مشاهده می‌شود مقدار حجم نفوذ آب به بتن ساده بدون چرخه برابر 13/2 میلی‌لیتر می‌باشد در صورتی که مقدار حجم نفوذ برای بتن ساده‌ای که تحت 150 سیکل یخ و ذوب قرار گرفته است برابر است با 18

میلی‌لیتر. به عبارتی تعداد 150 چرخه یخ و ذوب باعث افزایش مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن به مقدار حدود 36 درصد شده است. مقدار افزایش نفوذپذیری برای بتن‌های قرار گرفته در 50 و 100 سیکل نیز به ترتیب برابر 29 و 34 درصد می‌باشد.

افزودن ژل میکروسیلیس الیاف‌دار باعث کاهش مقدار نفوذپذیری آب به داخل بتن شده است. برای بتن ساده در شرایط معمولی، مقدار نفوذپذیری برابر 13/2 میلی‌لیتر می‌باشد در صورتی که برای بتن حاوی میکروسیلیس الیاف‌دار این مقدار برابر 6/6 میلی‌لیتر شده است. این مقدار برای بتن حاوی میکروسیلیس برابر 7/4 میلی‌لیتر می‌باشد. به عبارتی افزودن میکروسیلیس الیاف‌دار و میکروسیلیس باعث کاهش مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن به ترتیب در حدود 50 و 43 درصد شده است. زیرا موادی مانند ژل میکروسیلیس الیاف‌دار و میکروسیلیس، دارای خاصیت پرکنندگی بوده و خلل و فرج ریز داخل بتن را پر نموده و باعث کاهش مقدار حجم آب نفوذی به داخل بتن می‌گردد. مطابق شکل (6-ب) همچنین مشاهده می‌شود که این نوع افزودنی‌ها باعث کاهش تأثیرات شرایط حاد یخ و ذوب بر نفوذپذیری بتن شده است. زیرا مقدار افزایش حجم نفوذ آب به داخل بتن معمولی بعد از 150 سیکل یخ و ذوب برابر

زیرا ترک‌های ریز داخل بتن، تحت شرایط حاد شروع به گسترش نموده و این یکی از عوامل اصلی آسیب رسیدن به بتن می‌باشد. اما موادی مانند میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس، خلل و فرج ریز داخل بتن را پر نموده و باعث کاهش مقدار حجم آب نفوذی به داخل بتن می‌گردد. در تحقیقاتی که روی مقدار نفوذپذیری بتن انجام شده بیان گردیده که استفاده از موادی که دارای خاصیت پرکنندگی هستند، برای کاهش خلل و فرج بتن و در نتیجه بهبود دوام بتن مفید می‌باشد، البته مقاومت بتن نیز بر مقدار نفوذپذیری بتن تأثیرگذار می‌باشد (Banadkoki, 2017; Montes و همکاران، 2006; Mostafaei و Kabeyasawa، 2004; Ghiasvand و همکاران، 2014؛ آله، 2005).

در پژوهش‌های دیگر که با استفاده از آزمون محفظه استوانه-ای انجام پذیرفته است نیز نتایج تقریباً مشابهی به دست آمده است. در تحقیقی مقدار نفوذپذیری آب به بتن‌های با مقاومت 27 و 35 مگاپاسکال به ترتیب برابر 16/7 و 13/2 میلی‌لیتر به دست آمده است که دارای مشابهت زیادی با نتایج حاصل از این تحقیق دارد (که برابر 15 و 12/4 میلی‌لیتر می‌باشد) (Naderi و همکاران، 2020).

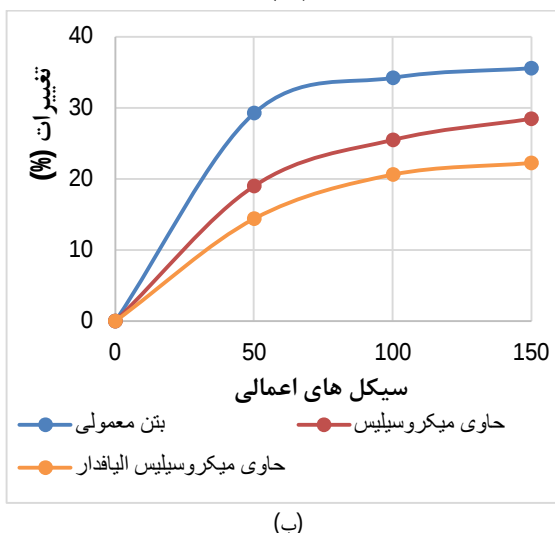
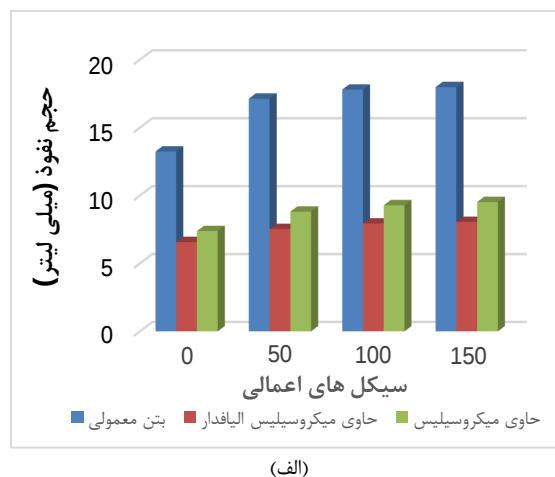
3-1-2- رابطه عمق نفوذ و حجم نفوذ آب به بتن

در این قسمت مقدار عمق نفوذ آب را محاسبه نموده و سپس رابطه آن با مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن مورد بررسی قرار داده می‌شود. پس از آن که با استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای مقدار حجم نفوذ آب به نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شد، نمونه‌ها در زیر جک بتن شکن قرار گرفته و به دو قسمت تقسیم می‌شوند. سپس مقدار دقیق عمق نفوذ آب به داخل بتن به صورت دقیق با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. در شکل (7) عمق نفوذ آب به داخل یک نمونه بتنی قابل مشاهده است.



شکل 7- اندازه‌گیری عمق نفوذ

36 درصد می‌باشد در صورتی که افزایش مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن حاوی میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس بعد از 150 سیکل به ترتیب برابر 22 و 28 درصد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار حجم آب نفوذی به بتن در ابتدای آزمایش دارای سرعت بیشتری است. اما با گذشت زمان، مقدار حجم آب نفوذی به بتن کاهش یافته است. دلیل این امر، این می‌باشد که با گذشت زمان، منافذ ریز و درشت داخل بتن با آب پر شده و لذا نرخ نفوذ آب کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که حدود 70 درصد از افزایش آب نفوذ کرده در بتن در 50 سیکل ابتدایی رخ داده است اما در 50 سیکل دوم و سوم به ترتیب فقط 22 و 8 درصد از افزایش نرخ نفوذ اتفاق افتاده است. در کل چرخه‌های یخ و ذوب به دلیل این که باعث افزایش نفوذ آب به داخل بتن می‌شود دارای تأثیر منفی روی دوام بتن می‌باشد.

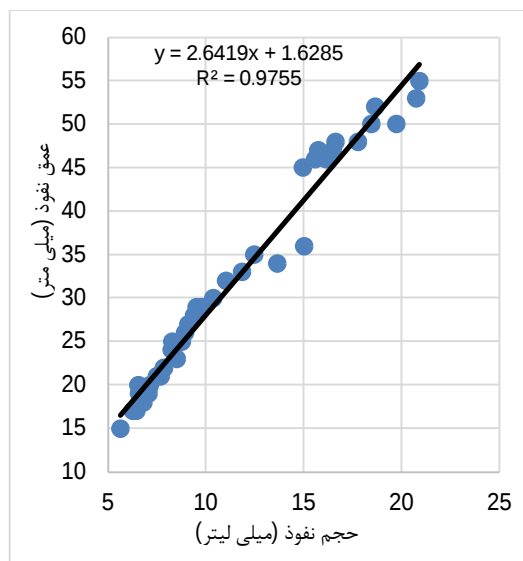


شکل 6- نتایج حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" در سیکل‌های مختلف ذوب و یخ: (الف) نفوذپذیری، (ب) تغییرات درصد کلی افزایش نفوذپذیری

کالیبراسیون شکل (9) مقدار عمق نفوذ آب به داخل نمونه‌ها را با دقت بالایی ارزیابی نمود.

$$y = 2.64x + 1.6 \quad (4)$$

در این معادله مقدار x برابر حجم نفوذ حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای بوده که با جای‌گذاری در معادله، مقدار عمق نفوذ بدون شکستن نمونه قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

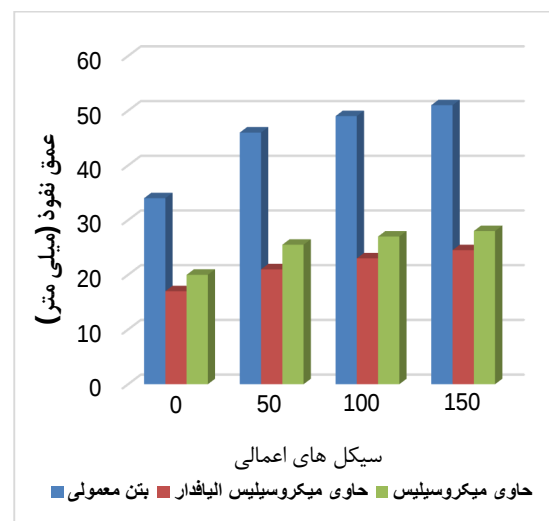


شکل 9- رابطه بین حجم نفوذ و عمق نفوذ نمونه‌ها

3-1-3- اثر مقاومت فشاری بتن بر نفوذپذیری

در این قسمت تأثیر مقاومت فشاری بر مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در بخش 2-3 توضیح داده شد، 4 نوع بتن با رده‌های مقاومتی 25، 30، 35 و 40 مگاپاسکال تهیه گردید. مطابق شکل (10) مقدار حجم نفوذ آب در بتن‌های معمولی با رده‌های مقاومتی فوق به ترتیب برابر 15، 13/6، 12/4 و 11/8 میلی‌لیتر می‌باشد. مشاهده می‌گردد که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن کاهش پیدا نموده است. به گونه‌ای که مقدار حجم نفوذ آب برای بتن با مقاومت 40 مگاپاسکال حدود 20 درصد کمتر از حجم نفوذ آب به داخل بتن با مقاومت 25 مگاپاسکال می‌باشد. همین روند برای بتن حاوی میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس نیز برقرار می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش مقاومت فشاری، مقدار حجم نفوذ به بتن‌های الیافی کاهش یافته است. با توجه به این‌که مقدار حجم نفوذ آب در خمیر سیمان، با پیشرفت هیدراسیون کاهش می‌یابد لذا بتن‌های با مقاومت بیشتر دارای نفوذپذیری کمتری می‌باشند. استفاده از مقدار مناسب سیمان به همراه نسبت‌های پایین‌تر آب به سیمان باعث افزایش غلظت خمیر سیمان شده و همین امر موجب کاهش منافذ ریز

در شکل (8) مقدار عمق نفوذ آب به داخل تمامی نمونه‌های بتنی عادی و حاوی افزونی و طی چرخه‌های مختلف نشان داده شده است. با مقایسه نتایج شکل (8) و نتایج شکل (6-الف) مشاهده می‌شود که روند مشابهی بین کاهش حجم نفوذپذیری نمونه‌ها و عمق نفوذ برقرار می‌باشد. عمق نفوذ بتن‌های حاوی میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس بسیار کمتر از عمق نفوذ بتن‌های معمولی می‌باشد. همچنین با اعمال چرخه‌های یخ و ذوب به بتن، مقدار عمق نفوذ آن افزایش یافته است. عمق نفوذ بتن عادی که در هیچ چرخه‌ای قرار نگرفته است برابر 34 میلی‌متر می‌باشد اما عمق نفوذ بتن‌های عادی 150 چرخه یخ و ذوب به مقدار 51 میلی‌متر رسیده است. همچنین با مقایسه عمق نفوذ بتن عادی با بتن‌های افزودنی در چرخه 150 مشاهده می‌شود که مقدار عمق نفوذ بتن حاوی میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس به ترتیب حدود 53 و 41 درصد کاهش یافته است. همچنین تأثیر چرخه‌های یخ و ذوب بر نمونه‌های حاوی افزودنی بسیار کمتر از نمونه‌های عادی می‌باشد.

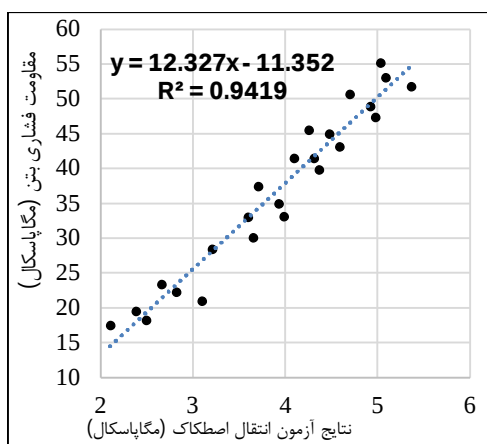


شکل 8- عمق نفوذ نمونه‌ها

در این قسمت رابطه بین عمق نفوذ نمونه‌های بتنی با مقدار حجم نفوذ آب به داخل آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (9) قابل مشاهده است، با رسم نمودار کالیبراسیون مربوطه، رابطه (4) بین عمق نفوذ نمونه‌ها با مقدار حجم نفوذ آب به داخل آن‌ها به دست می‌آید. لذا برای بتن‌های با مشخصات این تحقیق (مقاومت‌های 25، 30، 35 و 40 مگاپاسکال به صورت معمولی و به صورت اصلاح شده با میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس و طی چرخه‌های 0، 50، 100 و 150 سیکل یخ و ذوب) می‌توان با استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای، مقدار حجم نفوذ را اندازه‌گیری نموده و سپس بدون نیاز به شکستن نمونه و فقط با استفاده از نمودار

در شکل (11) رابطه میان مقاومت فشاری بتن با مقاومت در جای آن ارائه شده است. طبق شکل مذکور، با استفاده از رابطه خطی ارائه شده، مقدار ضریب تعیین بالای 94 درصد به دست آمده است. لذا مطابق شکل (11) و با استفاده از منحنی خطی و معادله (5)، می‌توان با جای‌گذاری نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک به جای x مقدار مقاومت فشاری بتن‌های با مشخصات مشابه را بدون شکستن نمونه و با دقت بالا ارزیابی نمود.

$$y = 12.327x - 11.35 \quad (5)$$

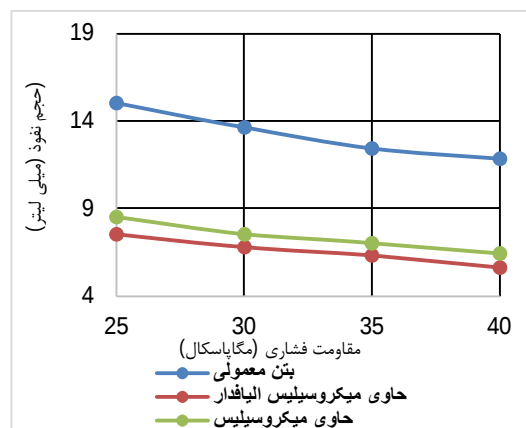


شکل 11- رابطه بین نتایج آزمون "انتقال اصطکاک" با مقاومت بتن

3-3- مدل‌سازی آزمون "انتقال اصطکاک" با نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS

در نرم‌افزار آباکوس، طیف وسیعی از خصوصیات رفتاری غیرالاستیک مواد برای کاربرد در مسائل مختلف موجود می‌باشد. در این نرم‌افزار به‌صورت کاملاً مجزا، خصوصیات رفتاری غیرالاستیک بتن توضیح داده شده است. یکی از مدل‌های موجود در برنامه آباکوس برای تحلیل و آنالیز بتن، مدل آسیب پلاستیک بتن می‌باشد که در این قسمت از تحقیق از این مدل استفاده شده است. مدل آسیب پلاستیک بتن مدل توانمندی است که جهت بارگذاری‌های متفاوت کاربرد داشته و با بیان رفتار مجزای بتن در کشش و فشار، رفتار بتن را به‌صورت واقع‌بینانه‌تر ارائه می‌کند. این مدل بر اساس یک مدل پلاستیک آسیب‌دیدگی می‌باشد که بر مبنای مدل ارائه شده توسط (Lubliner و همکاران، 1989) و اصلاح شده به‌وسیله لی (Lee و همکاران، 1998) قرار دارد. این مدل در محیط‌های Abaqus/Standard و Abaqus/Explicit برای مدل نمودن بتن و دیگر مواد شبه-شکننده در انواع المان‌های تیر، خرپا، پوسته و اجسام توپر تعبیه شده است.

در بتن می‌گردد. با ادامه فرآیند هیدراسیون، این منافذ ریز نیز مسدود شده و مقدار حجم نفوذ آب به بتن کاهش می‌یابد (Singh, 2021) در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است که با کاهش مقدار آب به سیمان و افزایش مقاومت فشاری، مقدار حجم نفوذ آب به بتن کاهش یافته است (Ahmad و همکاران، 2005; Georgiou و Kolias, 2005).



شکل 10- نفوذپذیری بتن با رده‌های مقاومتی مختلف

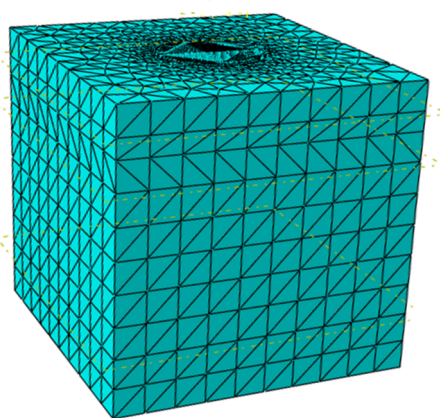
3-2- ارزیابی مقاومت فشاری در جای بتن بدون نیاز به شکستن نمونه

در این قسمت نمونه‌های بتنی با رده‌های مقاومتی 15، 20، 25، 30، 35، 40، 45 و 50 مگاپاسکال مورد آزمایش قرار گرفته است. تعدادی از نمونه‌های مکعبی زیر جک بتن شکن قرار گرفت. تعدادی دیگر از نمونه‌ها با مشخصات مشابه نیز تحت آزمون انتقال اصطکاک قرار گرفتند. سپس رابطه میان مقاومت فشاری بتن‌ها با نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (4) نتایج حاصل از مقاومت فشاری بتن‌ها و نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک قابل مشاهده است. موارد نشان داده شده در جدول (4) حاصل میانگین‌گیری بین نتایج سه آزمون می‌باشد.

جدول 4- نتایج آزمون انتقال اصطکاک و مقاومت فشاری بتن‌ها

ردیف	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	انتقال اصطکاک (مگاپاسکال)
1	18/4	2/3
2	22/3	2/8
3	30/5	3/4
4	35/2	3/8
5	40/9	4/2
6	44/5	4/4
7	49	4/9
8	53/3	5/1

می‌توان سایز مش‌بندی را به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفت. در آزمون انتقال اصطکاک المان‌بندی در قطعه بتن به‌صورت ترکیبی از دو نوع المان C3D8R و C3D4 المان‌بندی شده است. بخش اصلی قطعه که تحت فشار یا کشش قرار می‌گیرد با المان مکعبی 8 گرهی با انتگرال کاهش یافته C3D8R المان‌بندی شدند. اندازه المان در این بخش 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است که پس از همگرایی بین اندازه‌های 0/5، 1 و 2 میلی‌متر انتخاب شد. بخش‌های کناری که با نوع المان تتراگونال¹ 4 گرهی پیوسته المان‌بندی شده‌اند با حداکثر اندازه المان 15 میلی‌متر در کناره‌ها و حداقل اندازه المان 1 میلی‌متر در محل‌های متصل به المان‌های اصلی المان‌بندی شدند (شکل (13)).

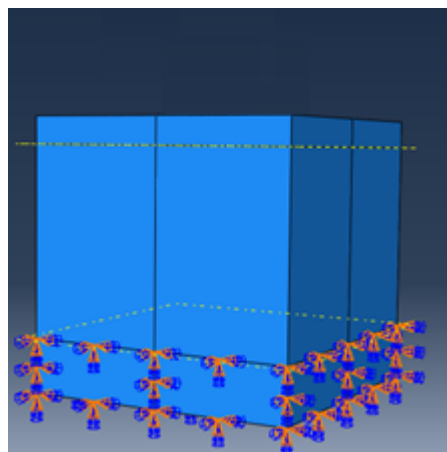


شکل 13- مش‌بندی نمونه

در نسخه‌های قبلی نرم‌افزار آباکوس، در روش آسیب پلاستیک بتن، امکان مشاهده شکست المان‌ها بعد از بارگذاری وجود نداشت اما در نسخه‌های 2019 به بعد، قابلیت مشاهده مرگ المان‌ها بر روی نمونه‌ها به نرم‌افزار اضافه گردیده است. نمونه آزمایش شده در آزمایشگاه با مقاومت فشاری مکعبی 24 مگاپاسکال که در آزمون انتقال اصطکاک در لنگر پیچشی 76 نیوتن‌متر دچار شکست گردید، مدل‌سازی گردید. در آزمون انتقال اصطکاک، مطابق با شکل (14)، گشتاور پیچشی به‌صورت دوران جابه‌جایی حول محور مغزه به محیط مغزه به‌کمک قید کوپلینگ به‌میزان 0/007 رادیان اعمال شد.

مقدار لنگر پیچشی وارده به مغزه در آزمون انتقال اصطکاک در برابر مقدار دوران آن برحسب رادیان در شکل (15) نشان داده شده است. از شکل (15) مشاهده می‌شود مقدار لنگر نهایی که عامل شکست مغزه شده است برابر 71 نیوتن‌متر می‌باشد که با مقایسه نتیجه حاصل از آزمایشگاه روی همین نمونه که برابر 76 نیوتن‌متر می‌باشد هم‌خوانی بالایی دارد.

در تعریف رفتار بتن بعد از ترک‌خوردگی در کشش، طبق پیش‌فرض نرم‌افزار، مقدار احیای سخت‌شوندگی فشاری ضریب w_c برابر 1 در نظر گرفته شد تا سخت‌شوندگی فشاری در حین بسته‌شدن ترک‌ها (پس از ترک‌خوردگی در کشش) کاملاً احیا شود. در مقابل، مقدار ضریب w_t برابر صفر در نظر گرفته شده است تا از احیای سخت‌شوندگی کششی صرف‌نظر شود. در ابتدا اقدام به مدل‌سازی قطعات آزمون "انتقال اصطکاک" از قبیل چسب، نمونه مکعبی 150 میلی‌متری بتن و استوانه فلزی شد. بدین‌منظور از دستور Create Part در نرم‌افزار استفاده گردید. برای معرفی مواد و منحنی تنش- کرنش و مقادیر مورد نیاز از قسمت Module Property و دستور Create Material استفاده شد. سرهم نمودن قطعات و مش‌بندی نیز با دستورات موجود در نرم‌افزار اجرا گردید. برای تعریف تکیه‌گاه‌ها در آزمون "انتقال اصطکاک"، با توجه به این‌که در آزمایشگاه، نمونه‌های بتن در داخل یک قاب فولادی قرار می‌گرفتند که اطراف بتن را از پایین به ارتفاع 30 میلی‌متر در بر می‌گرفت، لذا در مدل‌سازی نیز مطابق با شکل (12) تکیه‌گاه‌ها تعریف گردیدند.



شکل 12- تعریف شرایط مرزی در آزمون انتقال اصطکاک

نکته با اهمیت در مش‌بندی نمونه‌ها، همگرایی می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از حل یک مسئله در روش المان محدود همواره به سایز مش‌ها و اندازه‌های المان‌های مورد استفاده وابسته می‌باشد. با کاهش دادن ابعاد المان‌ها، حل مسئله به یک جواب واحد همگرا می‌گردد. البته بهبود سایز مش‌بندی باید به گونه‌ای انجام گردد تا موجب افزایش شدید حجم محاسبات نگردد. به‌دلیل وابستگی جواب‌های حل المان محدود به سایز مش‌بندی، همواره باید در قسمت‌هایی از مدل که مقادیر تنش، کرنش و یا هر پارامتر دیگری که باید به‌طور دقیق محاسبه شود، همگرایی مش‌بندی چک شود. در نواحی دور از نقاط تمرکز تنش

تحمل می‌کند 71 نیوتن متر است. مطابق شکل (16-الف) اولین ترک‌ها در نمونه در گشتاور 8 نیوتن متری در کناره‌های نمونه و از گوشه‌ها که تحت بیشترین گشتاور هستند شروع می‌شود. گوشه پایین‌تر که از طریق کرگیری ایجاد شده است و مقداری بالاتر از آن که محل قرارگیری لبه گیره فلزی است به صورت یک Notch عمل می‌کنند. گشتاور با افزایش دوران افزایش پیدا می‌کند تا این که به میزان 71 نیوتن متر برسد که در این لحظه مطابق شکل (16-ب) ترک‌ها به یکدیگر رسیده و خرابی رخ می‌دهد. از این لحظه به بعد سرعت خرابی‌ها به دلیل کاهش سطح مقطع و کاهش مقاومت مغزه بیشتر می‌شود و نهایتاً شکست کامل اتفاق می‌افتد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر افزودنی میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس، بر کاهش اثرات مخربی مانند سیکل‌های یخ و ذوب بر دوام بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از روش‌های نوینی برای اندازه‌گیری مقدار عمق نفوذ آب به بتن و ارزیابی مقاومت فشاری آن بدون نیاز به شکستن بتن استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصله داریم:

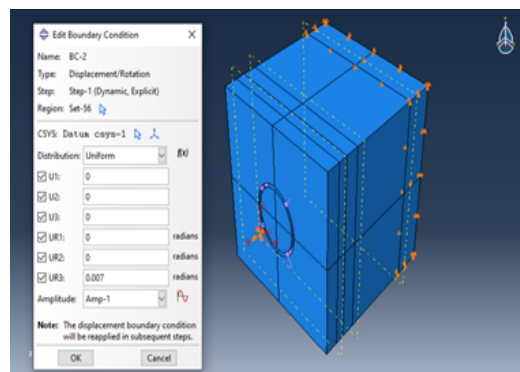
- ژل میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس باعث کاهش تأثیرات شرایط حاد یخ و ذوب بر نفوذپذیری بتن شده است. مقدار افزایش حجم نفوذ آب به داخل بتن معمولی بعد از 150 سیکل یخ و ذوب برابر 36 درصد می‌باشد در صورتی که افزایش مقدار حجم نفوذ آب به داخل بتن حاوی افزودنی‌های فوق بعد از 150 سیکل، به ترتیب برابر 22 و 28 درصد می‌باشد.

- طبق استانداردهای BS EN 12390-8 و DIN 1048-5 برای مشاهده عمق نفوذ، باید نمونه توسط جک بتن شکن شکسته شود، اما طبق نتایج با به کارگیری آزمون درجای محفظه استوانه‌ای، می‌توان بدون این که نیازی به تخریب نمونه باشد، مقدار عمق نفوذ را تعیین نمود.

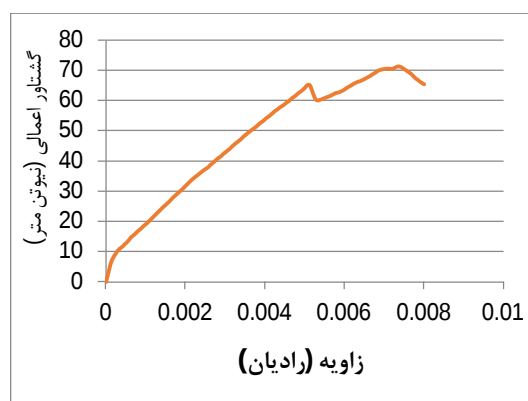
- معادله خطی $y=2.64x+1.6$ بین عمق نفوذ بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی میکروسیلیس الیافدار و میکروسیلیس، با نتایج حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای به دست آمد.

- با گذشت زمان، مقدار حجم آب نفوذی به بتن، دچار کاهش گردیده است. حدود 70 درصد از افزایش آب نفوذ کرده در بتن در 50 سیکل ابتدایی رخ داده است اما در 100 سیکل بعدی افزایش نرخ نفوذ کاهش یافته است.

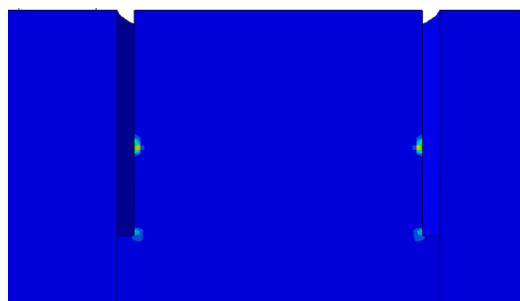
- با افزایش مقاومت فشاری، مقدار حجم نفوذ به بتن کاهش یافته است. مقدار حجم نفوذ آب برای بتن با مقاومت 40 مگاپاسکال حدود 20 درصد کمتر از حجم نفوذ آب به داخل بتن با مقاومت 25 مگاپاسکال می‌باشد.



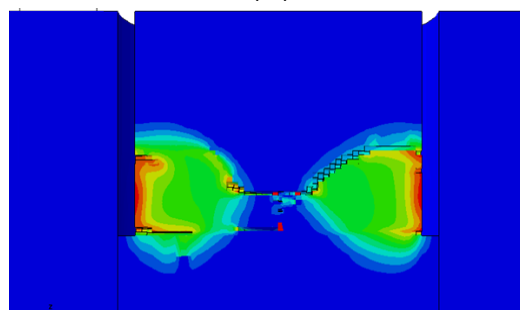
شکل 14- اعمال گشتاور پیچشی به مغزه



شکل 15- نمودار لنگر پیچشی وارده به مغزه



(الف)



(ب)

شکل 16- شکست مغزه در آزمون انتقال اصطکاک:

(الف) لحظه شروع ترک‌ها، (ب) لحظه شکست مغزه

در آزمون انتقال اصطکاک، ماکزیمم گشتاوری که مدل

- British Standards EN (BS 12390-2), "Testing hardened concrete, Making and curing specimens for strength tests", 2000, Part, 2.
- Cao D, Liu J, Zhou Y, Ge W, Zhang X, "Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on axial tension and compression performance of concrete after complete carbonization", *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/8111436>
- American Society for Testing and Materials (ASTM c-666), "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing", ASTM West Conshohocken, PA, USA, 2008.
- Dashtibadfarid M, Afrasiabi M, "Low-permeability concrete: Water-to-cement ratio optimization for designing drinking water reservoirs", *International Journal of Sciences and Innovation Engineering*, 2017, 2, 20-24.
- Dharan DS, Lal A, "Study the effect of polypropylene fiber in concrete", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, 3, 616-619.
- Etman ZA, Ahmed TI, "Effect of freezing-thawing on concrete behavior", *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 2018, 9, 21. <https://doi.org/10.20528/cjcr.1.2018.01.003>
- German Institute for Standardization (DIN 1048-5), "Testing concrete, testing of hardened concrete (specimens prepared in mould)", DIN Berlin, Germany, 1991.
- Ghiasvand E, Ramezaniapour A, Ramezaniapour A, "Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement", *Construction and Building Materials*, 2014, 53, 547-554. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.072>
- Houaria MBA, Abdelkader M, Marta C, Abdelhafid K, "Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature", *Energy Procedia*, 2017, 139, 725-730. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.278>
- Jl T, "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂", *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, 1943-1947. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>
- Kaboudan A, Naderi M, Afshar MA, "The efficiency of Darcy and two-dimensional diffusion flow models to estimate water penetration into concrete", *Journal of Building Engineering*, 2021, 34, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102012>
- Kene KS, Vairagade VS, Sathawane S, "Experimental study on behavior of steel and glass fiber reinforced concrete composites", *Bonfring International Journal of Industrial Engineering And Management Science*, 2012, 2, 125-130. <https://doi.org/10.9756/BIJEMS.1617>
- Kolias S, Georgiou C, "The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27, 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.009>
- Kong L, Ge Y, "Mechanism study of effect of coarse aggregate size on permeability of concrete", *ACI Materials Journal*, 2015, 112, 767. <https://doi.org/10.14359/51688181>

• با استفاده از منحنی خطی و معادله $y = 12.327x - 11.35$ می‌توان با جای‌گذاری نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک به جای x مقدار مقاومت فشاری بتن با رده‌های مقاومتی مختلف را بدون شکستن نمونه و با دقت بالا ارزیابی نمود.

• با توجه به مدل‌سازی اجزا محدود، مغزه بتنی با گشتاور 71 نیوتن‌متر دچار شکست شده است که این مقدار در آزمایشگاه و با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک برابر 76 نیوتن‌متر می‌باشد. که نشان از دقت بالای این آزمون برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

5- مراجع

- Afroughsabet V, Ozbakkaloglu T, "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 2015, 94, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>
- Ahmad S, Azad AK, Loughlin KF, "A study of permeability and tortuosity of concrete", 30th Conference on our World in Concrete and Structures, 2005, 23-30.
- Akkaya A, Çağatay İH, "Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods", *Construction and Building Materials*, 2021, 294, 123539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123539>
- Alsadey S, Salem M, "Influence of polypropylene fiber on strength of concrete", *American Journal of Engineering Research*, 5, 2016, 223-226.
- Amadi IG, Amadi-Oparaeli KI, "Effect of admixtures on strength and permeability of concrete", *The International Journal of Engineering and Science*, 2018, 7, 1-7. <https://doi.org/10.9790/1813-0707020107>
- American Concrete Institute (ACI 544), "Tate of the art report on fiber reinforced concrete", Reported by ACI Committee 544, ACI Structural Journal, 2002.
- American Concrete Institute (ACI 211.1), "Concrete mix design, aci committee 211, standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete", 1997.
- American Society for Testing and Materials (ASTM C494), "Standard specification for chemical admixtures for concrete", ASTM West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- American Society for Testing and Materials (ASTM c-1202), "Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", ASTM West Conshohocken, PA, USA, 1991.
- American Society for Testing and Materials (ASTM c-136-01), "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- American Society for Testing and Materials (ASTM c-127), "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of Coarse aggregate", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015a.
- American Society for Testing and Materials (ASTM c-128), "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015b.

- <https://doi.org/10.1080/00218464.2012.705673>
- Naderi M, Kaboudan A, Amin AM, "Experimental and theoretical study of the effect of concrete constituent materials on the permeability of hardened concrete using "Cylindrical chamber" method", Thesis of Kaboudan, A, Ph.D. Student. Imam Khomeini International University, Civil Department, 2020.
- Naderi M, Kaboudan A, "Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability", *Journal of Building Engineering*, 2021, 37, 101928. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101928>
- Naderi M, Kaboudan A, Kargarfard K, "Studying the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2021, 8, 25-43. <https://doi.org/10.22065/jsce.2019.154574.1697>
- Naderi M, Saberi Varzaneh A, "Determination of compressive and flexural strengths of in-situ pozzolanic concrete containing polypropylene and glass fibers using Twist-off Method", *Modares Civil Engineering Journal*, 2020, 20, 117-129. <https://doi.org/10.1001.1.24766763.1399.20.5.2.6>
- Naderi M, Smeali Zadeh S, "Ultimate strength of concrete beams strengthened by CFRP fabric and laminates, at high and freezing temperatures", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2016, 48, 39-52.
- Naderi M, Valibeigi R, Mir Safi SM, "Investigating the effect of kind of aggregate on strength and permeability of concrete", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2018, 5, 109-126. <https://doi.org/10.22065/jsce.2017.81402.1134>
- Ras M, "Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete". *Journal of Engineering Sciences*, 2006, 34, 1049-1059. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2006.110765>
- Saberi Varzaneh A, Naderi M, "Numerical and experimental study of in-situ methods to evaluate the mechanical properties of fiber-reinforced mortars", *AUT Journal of Civil Engineering*, 2021a, 5, 269-286. <https://doi.org/10.22060/ajce.2020.18319.5672>
- Saberi Varzaneh A, Naderi M, "Study of bond strength between polymer-modified mortars/concrete and their mechanical properties using "friction-transfer" and "pull-off" methods", *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 2021b, 8, 171-184. <https://doi.org/10.22075/mac.2021.20231.1251>
- Saberi Varzaneh A, Naderi M, "Experimental and Finite Element Study to Determine the Mechanical Properties and Bond Between Repair Mortars and Concrete Substrates", *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2022, 8, 493-509. <https://doi.org/10.22055/jacm.2020.32921.2101>
- Sadrmomtazi A, Fasihi A, "Influence of polypropylene fibers on the performance of nano-SiO₂-incorporated mortar", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering*, 2010, 34 (4), 385-395.
- Sakai Y, Yokoyama Y, Kishi T, "Relationship among the permeation rate of water into concrete, the mix design, curing, and the degree of drying", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2017, 15, 595-602. <https://doi.org/10.3151/jact.15.595>
- Salih SA, Al-Azaawee ME, "Effect of polypropylene fibers on properties of mortar containing crushed bricks as Lee S-T, Park S-H, Kim D-G, Kang J-M, "Effect of freeze-thaw cycles on the performance of concrete containing water-cooled and air-cooled slag", *Applied Sciences*, 2021, 11, 7291. <https://doi.org/10.3390/app11167291>
- Lee J, Fenves GL, "Plastic damage for cyclic loading of concrete structures", *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124 (8), 892-900. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- Liang M, Feng K, He C, Li Y, An L, Guo WA, "Meso-scale model toward concrete water permeability regarding aggregate permeability", *Construction and Building Materials*, 2020, 261, 120547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120547>
- Liu H, Luo G, Wei H, Yu H, "Strength, permeability, and freeze-thaw durability of pervious concrete with different aggregate sizes, porosities, and water-binder ratios", *Applied Sciences*, 2018, 8, 1217. <https://doi.org/10.3390/app8081217>
- Lubliner J, Oliver J, Oller S, Onate E, "A plastic damage model for concrete", *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25, 299-329. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- Mardani-Aghabaglou A, Tuyan M, Ramyar K, "Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates", *Materials and Structures*, 2015, 48, 2629-2640. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0342-3>
- Mesbah H, Buyle-Bodin F, "Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars", *Construction and Building Materials*, 1999, 13 439-447. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00047-1)
- Montes P, Bremner TW, Castellanos F, "Interactive effects of fly ash and CNI on corrosion of reinforced high-performance concrete", *Materials and Structures*, 2006, 39, 201-210. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9026-3>
- Mostafaei H, Kabeyasawa T, "Investigation and analysis of damage to buildings during the 2003 Bam earthquake", *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 2004, 79, 107-132.
- Naderi M, "Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials", *Construction and Building Materials*, 2005, 19, 454-459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.018>
- Naderi M, "Evaluating in situ shear strength of bituminous pavements", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 2006, 159, 61-65. <https://doi.org/10.1680/coma.2006.159.2.61>
- Naderi M, "Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method", *Registration of Patent in Companies and Industrial Property Office*, 2010. <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17381.6543>
- Naderi M, "An alternative method for in situ determination of rock strength", *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48, 1901-1905. <https://doi.org/10.1139/t11-079>
- Naderi M, Ghodousian O, "Adhesion of self-compacting overlays applied to different concrete substrates and its prediction by fuzzy logic", *The Journal of Adhesion*, 2012, 88, 848-865.

- aggregate", Engineering and Technology Journal, 2008, 26, 1508-1513. <https://doi.org/10.30684/etj.26.12.6>
- Singh NK, "Piracy and piratal aggressions in western indian ocean c. 1750-c", 1850. Maharaja Sayajirao University of Baroda, 2021.
- Xue W, Zhang H, Li H, Xu W, "Effect of early age loading on the subsequent mechanical and permeability properties of concrete and its mechanism analysis", Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14, 1208-1221. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.051>
- Yuan H, Liu J, Zhang X, Chen L, Zhang Q, Ma L, "Recent advances in membrane-based materials for desalination and gas separation", Journal of Cleaner Production, 2023, 135845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135845>
- Zare Banadkoki M, "Durability Evaluation of Concrete with High-volume Recyled Materials", 7th Annual National Concrete Conference, Tehran, 2017.
- Zareei SA, Ameri F, Dorostkar F, Ahmadi M, "Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties", Case Studies In Construction Materials, 2017, 7, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>
- Zhang Y, Xu S, Fang Z, Zhang J, Mao C, "Permeability of concrete and correlation with microstructure parameters determined by 1H NMR", Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/4969680>