



## بررسی تأثیر حجم کف روی پارامترهای نفوذ بتن کفی

علیرضا باقری\*، محمدمهدی رستگار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

### کلمات کلیدی:

بتن کفی

جذب آب

جذب موئینه

تخلخل

ضریب انتشار یون کلرید

**خلاصه:** در این پژوهش، تأثیر تخلخل ناشی از کف روی پارامترهای نفوذ بتن‌های کفی شامل جذب آب و نفوذ یون کلرید، بررسی شده است. پارامترهای نفوذ مخلوط‌های بتن کفی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و میزان کف ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد، تعیین و با مخلوط پایه فاقد کف در نسبت آب به سیمان برابر مقایسه شده است. همچنین پارامترهای نفوذ بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰ درصد تعیین و با بتن معمولی با مقاومت برابر مقایسه شده است. نتایج، بیانگر آن است که با افزایش تخلخل کفی، جذب آب و ضریب جذب موئینه کاهش یافته ولیکن ضریب انتشار یون کلرید افزایش می‌یابد. تناقض مشاهده شده، ناشی از نحوه محاسبه نتایج در آزمایش‌های جذب است که به صورت حجم آب جذب شده به ازای حجم کل بتن می‌باشد. با محاسبه حجم آب به ازای حجم خمیر سیمان که فاز نفوذپذیر است، مشخص گردید که مقدار جذب آب با ادغام کف افزایش می‌یابد که مشابه با روند نتایج نفوذ یون کلرید است. افزودن ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد حجم کف به مخلوط پایه، باعث افزایش جذب آب فاز خمیر سیمان به ترتیب برابر ۱۲، ۲۷ و ۵۰ درصد و افزایش ضریب انتشار یون کلرید به ترتیب برابر ۱۸، ۵۵ و ۱۵۵ درصد گردید. بررسی ساختار منافذ کفی نشان داد که با افزایش حجم کف، قطر منافذ افزایش و بخشی از آن‌ها با هم ادغام می‌شوند. در عین حال، بتن کفی سازه‌ای، عملکردی مشابه مخلوط پایه داشت و همچنین نسبت به بتن معمولی با مقاومت برابر، نفوذپذیری کمتری از خود نشان داد.

### ۱- مقدمه

انجام شده در خصوص بتن‌های کفی در رابطه با خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بوده و دوام این نوع بتن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۹ و ۳ و ۲].

توسعه کاربرد بتن‌های کفی برای مقاصد سازه‌ای، مستلزم استفاده از آرما توری در این نوع بتن‌ها می‌باشد و لذا مباحث مرتبط با دوام در برابر خوردگی آرما تورها در بتن‌های کفی حائز اهمیت است. کربناته شدن بتن و کاهش قلیائیت آن از عوامل مهم از بین رفتن لایه انفعالی سطوح میلگردها و شروع خوردگی آن‌ها در بتن می‌باشد. عملکرد بتن کفی به لحاظ مقاومت در برابر کربناسیون

بتن کفی، یکی از انواع بتن‌های سبک می‌باشد که از ترکیب حباب‌های ریز با خمیر سیمان و یا ملات ایجاد می‌گردد [۱-۳]. از مزیت‌های این بتن می‌توان به سبکی، هزینه کم، عایق بندی حرارتی و عدم نیاز آن به سنگدانه‌های سبک اشاره نمود [۳-۵]. در ابتدا از بتن کفی به عنوان عایق و مصالح پرکننده استفاده می‌شد ولی اکنون با پیشرفت تکنولوژی، ساخت بتن‌های کفی پایدار با مقاومت بالا، زمینه ساز بستری مناسب جهت تولید بتن‌های کفی با مقاومت سازه‌ای و نیمه سازه‌ای گردیده است [۵-۸]. عمده تحقیق‌های قبلی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bagheri@kntu.ac.ir

توسط جونز<sup>۱</sup> و مکاریتی<sup>۲</sup> (۱۰ و ۸) مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های این محققین نشانگر این است که ادغام حباب‌های کف باعث افزایش نرخ کربناته شدن بتن می‌گردد. همچنین بر اساس نتایج بررسی آزمایشگاهی لون<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱]، بتن‌های کفی با چگالی‌های ۱۸۰۰ و ۱۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب دارای نرخ کربناته شدن برابر ۴/۴ و ۱۶/۳ میلی‌متر بر مجذور سال بوده‌اند که نشانگر اثر منفی حباب‌های کفی بر کربناسیون است. نتایج گزارش شده توسط نامسون<sup>۴</sup> و همکاران [۱۲] نیز نشانگر اثر منفی افزایش حجم کف بر دوام در برابر کربناسیون بوده است.

نفوذ یون کلرید در بتن، از دیگر دلایل اصلی خوردگی آرماتورها در بتن است. مکانیزم‌های اصلی نفوذ یون کلرید در بتن، شامل مکش موئینه، جذب آب و انتشار می‌باشند. با توجه به موضوع تحقیق حاضر، در ادامه، یافته‌های محققین قبلی در خصوص اثر مقدار تخلخل کفی روی این پارامترها ارائه می‌گردد.

جذب آب از مهم‌ترین مکانیزم‌های نفوذ عوامل مهاجم به داخل بتن محسوب می‌گردد [۱۵-۱۳]. تأثیر میزان تخلخل ناشی از کف در جذب آب بتن کفی توسط برخی از محققین بررسی گردیده است. مشخص شده است که جرم حجمی کمتر بتن کفی در مقایسه با بتن معمولی باعث می‌شود جذب آب آن به صورت درصد وزنی، اعداد بزرگتری را در مقایسه با بتن معمولی به ازای مقدار برابر آب جذب شده نشان دهد. لذا مقایسه نتایج به صورت درصد وزنی گمراه‌کننده است و تعیین جذب آب به صورت درصد حجمی، امکان مقایسه واقعی‌تری را با مقادیر مربوط به بتن معمولی فراهم می‌نماید [۱۸-۱۶]. کرسلی<sup>۵</sup> و وینرایت<sup>۶</sup> [۱۷] گزارش کرده‌اند که اثر حجم کف در جذب آب حجمی بتن کفی، اندک می‌باشد. کاکس<sup>۷</sup> و واندیک<sup>۸</sup> [۱۹] مقادیر جذب آب بتن‌های کفی را بالاتر از بتن‌های معمولی گزارش کرده‌اند. با توجه به اینکه حجم خمیر سیمان در بتن‌های معمولی بسیار بیشتر از بتن‌های کفی است و با توجه به اینکه جذب آب عمدتاً در این فاز رخ می‌دهد، این نتایج را نمی‌توان نشانگر اثر منفی کف بر

- 1 Jones
- 2 McCarthy
- 3 Loon
- 4 Namson
- 5 Kearsley
- 6 Wainwright
- 7 Cox
- 8 Van Dijk

جذب آب تلقی نمود. تحقیقاتی که توسط نامبیاری<sup>۹</sup> و رامامورتی<sup>۱۰</sup> [۱۸] بر روی جذب آب بتن‌های کفی با حجم متفاوت کف صورت گرفته است، بیانگر قدری کاهش در جذب آب با افزایش حجم کف می‌باشد. بر اساس یافته‌های آن‌ها، جذب آب اساساً در حجم خمیر سیمان رخ می‌دهد و سهم تخلخل ناشی از کف در جذب آب ناچیز می‌باشد. همچنین این محققین گزارش کرده‌اند که با افزایش حجم کف، جذب موئینه بتن‌های کفی کاهش می‌یابد. هلال<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۶] نیز اظهار داشته‌اند که با افزایش حجم کف، جذب آب کاهش می‌یابد. طبق نظر این محققین، تخلخل ناشی از کف عمدتاً از هم مجزا بوده، لذا نقش اندکی در جذب آب ایفا می‌نمایند. در عین حال پانسار<sup>۱۲</sup> [۲۰] گزارش کرده است که مقادیر بالای حجم کف می‌تواند به علت ارتباط بین منافذ کفی، منجر به افزایش جذب آب گردد. تحقیقات اخیر که توسط شی<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۱] پیرامون جذب موئینه در بتن‌های کفی صورت گرفته است، حاکی از کاهش جذب موئینه با افزایش حجم کف می‌باشد. بر اساس نظر این محققین، هنگامی که آب از طریق حفرات موئینه خمیر سیمان به جدار حفرات هوا می‌رسد، لایه‌ای از آب به سرعت سطح پیرامون حفره هوا را در برمی‌گیرد ولیکن به علت فشار داخلی موجود در حفره، از ورود آب به داخل آن جلوگیری می‌گردد.

پدیده انتشار، از مهم‌ترین مکانیزم‌های نفوذ یون کلرید به داخل بتن می‌باشد. بررسی‌های قبلی در خصوص انتشار یون کلرید در بتن کفی بسیار محدود می‌باشد و بر اساس بررسی مراجع، تنها یک تحقیق در این خصوص گزارش شده است. مطالعات آزمایشگاهی بریدی<sup>۱۴</sup> و همکاران [۲۲] پیرامون انتشار یون کلرید بتن‌های کفی با سه دانسیته متفاوت، حاکی از آن است که تغییرات در مقدار کف، تفاوت محسوسی در انتشار یون کلرید ایجاد نمی‌نماید؛ همچنین آن‌ها اظهار داشته‌اند که انتشار یون کلرید در بتن کفی، به مراتب بیشتر از بتن معمولی با نسبت آب به سیمان برابر می‌باشد.

با توجه به محدود بودن بررسی‌های قبلی در خصوص نفوذ یون کلرید در بتن کفی و همچنین اهمیت جذب آب و پدیده انتشار به عنوان مکانیزم‌های اصلی ورود یون مذکور به داخل بتن، در تحقیق

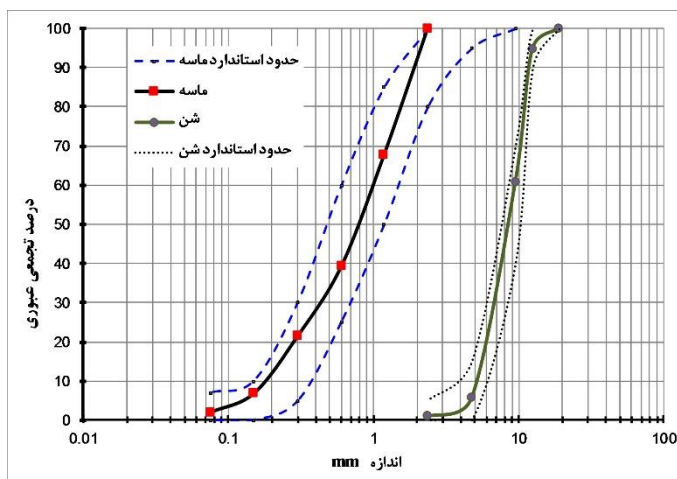
- 9 Nambiar
- 10 Ramamurthy
- 11 Hilal
- 12 Panesar
- 13 She
- 14 Brady

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان

Table 1. Chemical and physical properties of cement

ترکیبات شیمیایی (%)											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
۲۱/۲	۴/۹	۳/۵	۶۳/۲	۳/۷	۰/۱۸	۰/۵۱	۲/۲	۵۳/۴	۲۰/۱	۶/۹	۱۰/۴

زمان گیرش اولیه و نهایی: ۱۴۰ و ۱۹۰ دقیقه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت مخلوطها  
Fig. 1. Gradation curve of aggregates used in production of the mixes

در متر مکعب می‌باشد. برای ساخت بتن معمولی، علاوه بر ماسه ذکر شده، از سنگدانه نخودی شکسته با حداکثر سایز ۱۲/۵ میلی‌متر با جذب آب ۲/۵ درصد و دانسیته اشباع با سطح خشک ۲۵۵۰ کیلوگرم در متر مکعب استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۳- عصاره کف

عصاره کف پروتئینی، مطابق با الزامات ASTM C۷۹۶ [۲۴] با چگالی ۱/۱۹ و بر اساس توصیه سازنده، با نسبت ترکیب با آب ۱ به ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۱-۴- آب مصرفی

جهت ساخت طرح مخلوط‌ها، از آب شرب شهری استفاده گردیده است.

حاضر، مطالعات آزمایشگاهی جهت دستیابی اطلاعات جدید در این زمینه صورت گرفته که جزییات آن در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

سیمان پرتلند تیپ ۱ مطابق با الزامات ASTM C۱۵۰ [۲۳] با مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی ملات استاندارد آن، ۴۰ مگاپاسکال و ترکیبات شیمیایی مطابق جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

سنگدانه مورد استفاده جهت تولید بتن کفی، ماسه نیمه شکسته با حداکثر سایز ۲/۳۶ میلی‌متر بوده است که به ترتیب دارای جذب آب و دانسیته اشباع با سطح خشک ۲/۶۷ درصد و ۲۵۷۰ کیلوگرم

جدول ۲. مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌ها

Table 2. The amount and proportions of mixture ingredients

کد مخلوط	سیمان	آب	ماسه	شن	نسبت آب به سیمان	حجم خمیر سیمان	مقدار کف	نسبت سنگدانه به سیمان
	( کیلوگرم در مترمکعب )					مترمکعب	درصد	
B-0.5	۸۲۵	۴۱۳	۸۲۵	۰	۰/۵	۰/۶۸	۰	۱
F20-0.5	۶۶۰	۳۳۰	۶۶۰	۰	۰/۵	۰/۵۴	۲۰	۱
F35-0.5	۵۳۶	۲۶۸	۵۳۶	۰	۰/۵	۰/۴۴	۳۵	۱
F50-0.5	۴۱۳	۲۰۶	۴۱۳	۰	۰/۵	۰/۳۴	۵۰	۱
F20-0.4	۵۸۵	۲۳۴	۹۷۰	۰	۰/۴	۰/۴۲	۲۰	۱/۶۶
C-0.71	۳۵۰	۲۴۸/۵	۱۱۲۷	۵۱۰	۰/۷۱	۰/۳۶	۰	۴/۶۷



شکل ۲. تجهیزات مورد استفاده جهت ساخت و عملآوری بتن کفی (الف) دستگاه فوم ژنراتور (ب) مخلوطکن (ج) انکوباتور  
Fig. 2. Equipment used for the production and curing of foamed concrete (a) Foam generator (b) Mixer (c) Incubator

جدول ۲ ارائه شده است. کدهای اختصاص یافته برای مخلوط‌ها شامل یک حرف است که نوع مخلوط را نشان می‌دهد (B ملات پایه فاقد کف، F بتن کفی و C بتن معمولی). عددی که بلافاصله بعد از این حرف ذکر شده، نمایانگر درصد حجم کف و عدد بعد از خط تیره، نشان دهنده نسبت آب به سیمان می‌باشد، به عنوان مثال، کد ۰.۵-F۳۵ معرف بتن کفی با حجم کف ۳۵ درصد و نسبت آب به سیمان ۰/۵ می‌باشد. با مشخص بودن نسبت آب به سیمان، نسبت سنگدانه به سیمان و حجم کف، مقادیر مصالح مصرفی با استفاده از روش حجم مطلق محاسبه گردیده است. برای ساخت بتن کفی، از

۲-۲- مخلوط‌های مورد بررسی و نحوه ساخت و آماده سازی آزمونه‌ها به منظور بررسی مستقیم اثر حجم کف بر خصوصیات جذب و نفوذ بتن کفی، ۴ طرح مخلوط با نسبت‌های یکسان اجزای فاز ملات اما با حجم‌های متفاوت کف، شامل ۰٪ (مخلوط پایه)، ۲۰٪، ۳۵٪ و ۵۰٪ در نظر گرفته شده است. نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه به سیمان در این طرح مخلوط‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۱ می‌باشد. بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰٪ به منظور دستیابی به مقاومت سازه‌ای و بتن معمولی با مقاومت برابر با بتن کفی سازه‌ای جهت مقایسه ساخته شدند که مشخصات طرح مخلوط‌ها در



شکل ۴. چگونگی قرارگیری آزمون‌ها در آزمایش جذب آب موئینه  
**Fig. 4. The specimens during the capillary water absorption test**

استاندارد ASTM C ۷۹۶ [۲۴] اندازه‌گیری شده است.

### ۳-۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

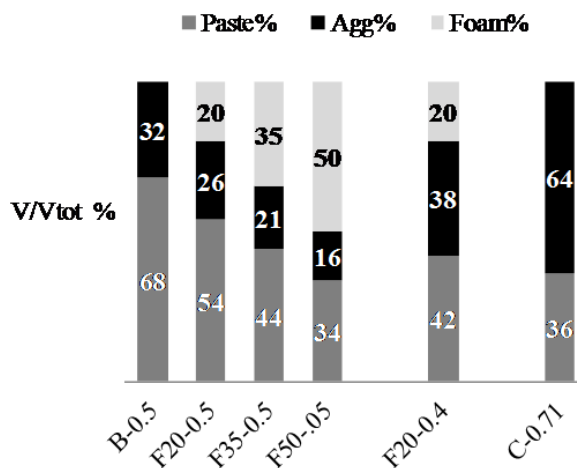
برای تعیین مقاومت فشاری هر مخلوط ساخته شده، از ۳ آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری مطابق با استاندارد BS EN ۱۲۳۹۰-۳ [۲۵] استفاده شده است. این آزمون‌ها پس از بیرون آوردن از قالب، جهت عمل‌آوری داخل انکوباتور با رطوبت حداقل ۹۵ درصد انتقال یافته و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه از آن خارج گردیده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند.

### ۳-۳-۲-۴- بررسی ساختار منافذ کفی توسط میکروسکوپ الکترونی

بررسی ساختار منافذ ناشی از ادغام کف در بتن‌های کفی توسط تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و با درصد کف ۲۰، ۳۵ و ۵۰ انجام گردید. در این آزمایش، شعاع الکترونی به سطح نمونه تابانده و الکترون‌های ثانویه برخاسته از سطح، توسط آشکارساز جمع‌آوری و پردازش شده و تبدیل به تصویر توپوگرافی سطح می‌گردد. پوشاندن لایه‌ای از طلا به ضخامت حدود ۳۰ نانومتر روی سطح نمونه باعث افزایش الکترون‌های ثانویه و افزایش وضوح تصویر توپوگرافی سطح می‌گردد.

### ۳-۳-۲-۵- آزمایش جذب آب موئینه

جهت انجام این آزمایش، از ۳ آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری



شکل ۳. درصد حجم خمیر سیمان، سنگدانه و کف در یک متر مکعب برای مخلوط‌های مورد بررسی

**Fig. 3. Percentage of volume of paste, aggregates and foam per cubic meter of the mixtures studied**

روش پیش‌کف‌زایی استفاده شده و کف مورد نیاز توسط دستگاه فوم ژنراتور در مقیاس آزمایشگاهی، مطابق شکل ۲-الف تهیه شده است. مخلوط پایه، از ترکیب سیمان، ماسه و آب در مخلوط‌کن تاوهای (شکل ۲-ب) به مدت زمان ۵ دقیقه ایجاد گردیده است. برای تولید بتن کفی، حجم کف مورد نیاز به مخلوط پایه اضافه شده و مخلوط کردن تا رسیدن به یک مخلوط بتن کفی همگن ادامه می‌یابد. بتن معمولی نیز مطابق با روش ذکر شده، جهت تولید مخلوط پایه تهیه شده است. از هر مخلوط متناسب با هر آزمایش، آزمون‌های لازم تهیه و به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور مطابق شکل ۲-ج با رطوبت حداقل ۹۵ درصد نگهداری و سپس از قالب خارج شده و متناسب با شرایط هر آزمایش تا سن مقرر نگهداری شده‌اند. درصد‌های حجم سنگدانه، خمیر سیمان و کف در یک متر مکعب برای هر طرح مخلوط در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۳-۲- آزمایش‌های انجام شده

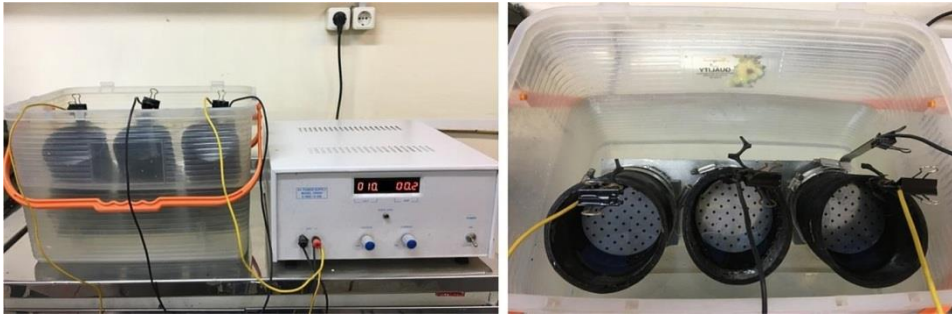
#### ۳-۲-۱- تعیین دانسیته کف

دانسیته کف تولید شده، مطابق با استاندارد ASTM C ۷۹۶ [۲۴] اندازه‌گیری شده است.

#### ۳-۲-۲- تعیین دانسیته بتن تازه

دانسیته بتن معمولی و بتن کفی مطابق با روش ذکر شده در





شکل ۵. نحوه انجام آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT)  
Fig. 5. The RCMT test setup

از ۳ نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی متری برای هر مخلوط استفاده شده است. در این پژوهش، نمونه‌ها به روش اشباع در خلأ، مطابق روشی که هلال و همکاران [۱۶] و کرسلی و وینرایت [۲۷] شرح داده‌اند، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. پس از قرار گرفتن نمونه‌ها درون اتاقک مرطوب با رطوبت حداقل ۹۵ درصد تا سن ۲۸ روز، نمونه‌ها بیرون آورده شده و درون آون با دمای  $5 \pm 10$  درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت ( $W_{dry}$ ) قرار می‌گیرند؛ سپس نمونه‌ها درون دسیکاتور قرار گرفته و فشاری معادل با ۵۰۰ میلی‌متر جیوه به مدت ۳ ساعت بر روی آن‌ها اعمال می‌گردد؛ بعد از آن، آب به داخل دستگاه دسیکاتور هدایت شده تا روی سطح نمونه را بپوشاند. سپس برای بار دیگر، عمل خلأ به مدت ۳ ساعت بر روی نمونه‌ها اعمال می‌گردد و در نهایت نمونه‌ها به مدت ۱۰ ساعت درون آب با فشار نرمال باقی مانده و بعد از آن بیرون آمده و وزن اشباع با سطح خشک نمونه در هوا ( $W_{s,a}$ ) و آب ( $W_{s,w}$ ) مورد محاسبه قرار می‌گیرد و در پایان، تخلخل کلی نمونه ( $Q_{tot}$ ) توسط رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\text{جذب آب حجمی} = \frac{W_{s,a} - W_{dry}}{W_{s,a} - W_{s,w}} \times 100 \quad (2)$$

جذب آب، بیانگر میزان منافذ قابل دسترس توسط آب می‌باشد که عمدتاً شامل منافذ موئینه و ژلی است. جذب حجمی بتن به عنوان تخلخل ظاهری ( $\emptyset_{app}$ ) اطلاق می‌گردد که حفرات هوای منفک، نقشی در تخلخل ظاهری ایفا نمی‌نمایند [۱۶].

#### ۲-۳-۷- آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید

آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT) در سن ۲۸ روز، مطابق با روش ۴۹۲ NT Build [۲۸] بر روی ۳ نمونه استوانه‌ای با

برای هر مخلوط استفاده گردید. نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز درون انکوباتور با رطوبت حداقل ۹۵ درصد قرار گرفته و سپس مطابق با دستورالعمل RILEM CPC ۱۱.۲ [۲۶] آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز درون آون با دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفته و بعد از خنک شدن در دمای آزمایشگاه، سطح تحتانی نمونه‌ها همان گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است در تماس با آب قرار می‌گیرد. سطح آب در طول زمان آزمایش در تراز  $1 \pm 5$  میلی‌متر از کف ثابت نگه داشته شده است. در این روش،  $i$  که میزان آب جذب شده در واحد سطح در زمان  $t$  می‌باشد، محاسبه می‌گردد و با ترسیم نقاط به دست آمده در دستگاه  $i-\sqrt{t}$  و برازش یک خط مستقیم از این نقاط، ضریب جذب آب موئینه  $S$  (شیب خط برازش شده) و ثابت جذب آب موئینه  $C$  (عرض از مبدأ خط برازش شده) به دست می‌آید. رابطه عمومی خط برازش شده مطابق با رابطه (۱) می‌باشد.

$$i = C + S\sqrt{t} \quad (1)$$

که در آن:

$i$  = میزان آب جذب شده در واحد سطح [ $gr/mm^2$ ] برابر با عمق معادل نفوذ آب [mm]

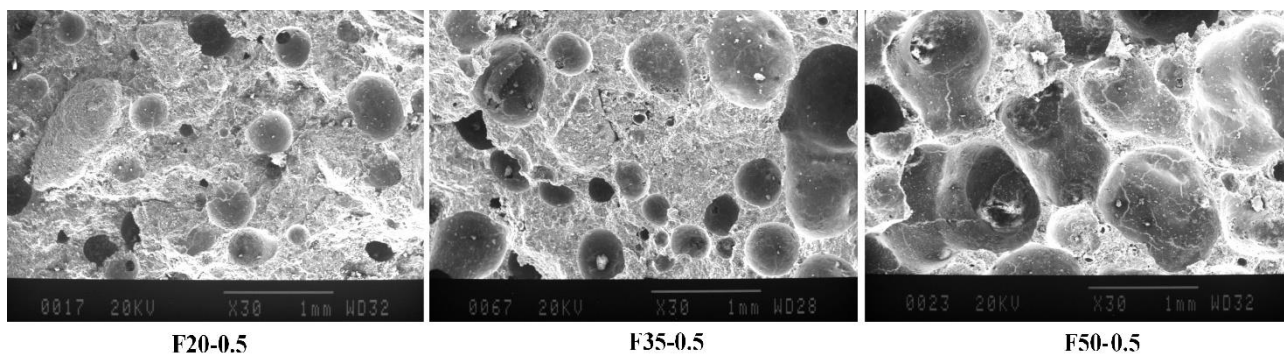
$C$  = ثابت جذب آب موئینه [mm]

$S$  = ضریب جذب آب موئینه [ $mm/min^{.5}$ ]

$t$  = زمان [min]

#### ۲-۳-۶- اندازه‌گیری تخلخل کلی

تخلخل کلی بتن کفی، شامل تخلخل موئینه و ژلی موجود در خمیر سیمان و تخلخل ناشی از کف می‌باشد که جهت تعیین آن



شکل ۶. تصاویر SEM مخلوط‌های بتن کفی با بزرگ‌نمایی ۳۰ برابر  
 Fig. 6 . SEM images of foamed concrete mixes with 30x magnification

جدول ۳. مقادیر دانسیته و مقاومت فشاری مخلوط‌ها  
 Table 3. Density and compressive strength of mixtures

کد مخلوط	دانسیته طراحی	دانسیته اندازه‌گیری شده	مقاومت فشاری ( مگاپاسکال )		
			۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
		( کیلوگرم در مترمکعب )	۷	۲۸	۹۰
B-0.5	۲۰۶۳	۲۰۸۱	۲۰/۴	۳۶/۹	۴۳/۳
F20-0.5	۱۶۶۰	۱۶۴۸	۸	۱۳/۱	۱۶/۸
F35-0.5	۱۳۵۹	۱۳۷۱	۳/۵	۶	۸/۱
F50-0.5	۱۰۵۸	۱۰۴۳	۲/۱	۳/۱	۳/۷
F20-0.4	۱۷۹۹	۱۷۸۵	۲۱/۲	۲۴/۶	۲۹/۷
C-0.71	۲۲۳۵	۲۲۱۵	۱۸/۵	۲۵/۲	۳۲/۹

نمونه قرار داده می‌شود، اختلاف پتانسیلی متناسب با جریان عبوری اولیه اعمال و یون‌های کلرید به داخل نمونه رانده می‌شود. عمق نفوذ یون‌های کلرید با دو نیم کردن نمونه و پاشش محلول نیترات نقره به سطح شکسته شده به دست می‌آید. با استفاده از میانگین عمق نفوذ یون کلر در آزمون‌ها، ضریب مهاجرت سریع یون کلرید ( $D_{RCMT}$ ) طبق رابطه ارائه شده در استاندارد ۴۹۲ NT Build [۲۸] محاسبه می‌گردد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

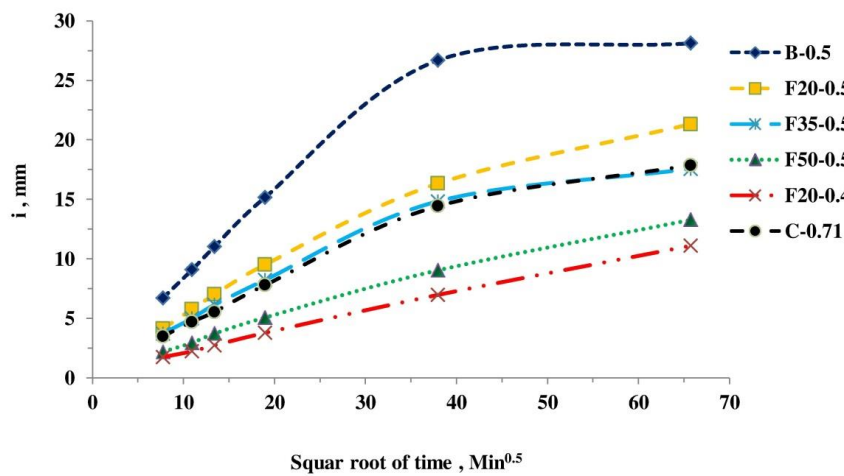
#### ۳-۱- دانسیته بتن تازه

دانسیته اندازه‌گیری شده مخلوط‌ها، بلافاصله پس از ساخت در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر در محدوده ۵۰ کیلوگرم در متر

قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر برای هر طرح مخلوط، صورت گرفته است. آزمون‌ها به مدت ۲۱ روز درون انکوباتور با رطوبت نسبی حداقل ۹۵ درصد و سپس به مدت یک هفته (تا سن ۲۸ روز) درون حوضچه آب به صورت اشباع قرار گرفته، تا حفرات ژلی و موئینه آن‌ها به طور کافی اشباع شوند. در روش استاندارد، آماده‌سازی آزمون‌های بتن معمولی به صورت اشباع در خلأ صورت می‌پذیرد تا از اشباع بودن منافذ در پدیده انتشار، اطمینان حاصل گردد؛ اما استفاده از این روش، برخلاف روش معمول غوطه‌وری، برای بتن‌های کفی، منجر به پر شدن حفرات ناشی از کف می‌گردد. پس از آماده‌سازی، آزمون‌ها در قالب‌های لاستیکی مطابق شکل ۵ قرار گرفته و قسمت فوقانی و تحتانی آن‌ها به ترتیب در معرض محلول ۰/۳ مولار NaOH و ۱۰٪ NaCl قرار گرفته است و توسط الکترودهایی که در دو سر

جدول ۴. نتایج جذب آب و ضریب انتشار یون کلرید  
Table 4. Results of absorption and diffusion tests

کد طرح	ضریب جذب موئینه بتن	جذب آب بتن	تخلخل ظاهری $\emptyset_{app}$	تخلخل کلی $\emptyset_{tot}$	$\emptyset_{tot} - \emptyset_{app}$	حفرات هوای پر شده با آب	ضریب جذب موئینه خمیر سیمان	جذب آب خمیر سیمان	ضریب انتشار یون کلرید $D_{RCMT(28)}$	
	(mm/min <sup>0.5</sup> )	% by weight	% by volume	(%)	(%)	(%)	(%vol. of concrete)	(mm/min <sup>0.5</sup> )	(% volume)	(10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)
B-0.5	۰/۷۶	۱۶/۱	۲۹/۴	۲۹/۴	۲۹/۵	۰/۱	-	۱/۱۱	۴۰	۲۲/۷
F20-0.5	۰/۴۸	۱۸/۴	۲۶	۲۶	۴۳/۴	۱۷/۴	۲/۶	۰/۸۹	۴۴/۸	۲۶/۸
F35-0.5	۰/۴	۲۱/۲	۲۳/۷	۲۳/۷	۵۴	۳۰/۳	۴/۷	۰/۹۱	۵۰/۷	۳۵/۲
F50-0.5	۰/۲۶	۲۳/۶	۲۱/۴	۲۱/۴	۶۴/۷	۴۳/۳	۶/۸	۰/۷۶	۶۰	۵۷/۹
F20-0.4	۰/۱۸	۱۱/۲	۱۳/۷	۱۳/۷	۳۱/۷	۱۸	۲	۰/۴۷	۲۶/۴	۱۵/۱
C-0.71	۰/۳۹	۱۰/۷	۲۱/۷	۲۱/۷	۲۲/۹	۱/۲	-	۱/۰۶	۴۸/۳	۳۵



شکل ۷. نتایج آزمایش جذب موئینه (حجم آب جذب شده در واحد سطح مقطع نمونه بتنی در مجذور زمان)

Fig. 7. Result of the capillary absorption test (volume of water absorbed per unit cross section of concrete specimen plotted against square root of time)

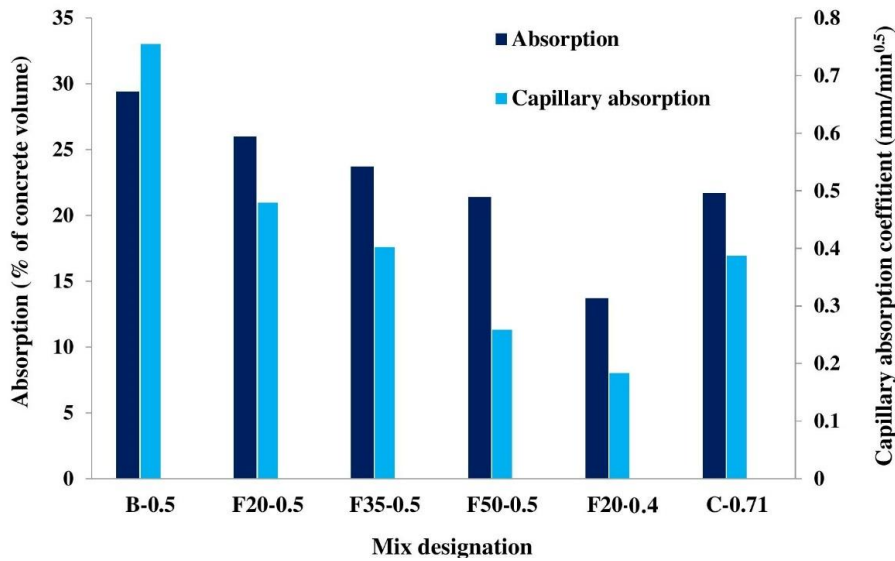
پایه ۳۶/۹ مگاپاسکال است که افزایش حجم کف به آن، منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت نمونه‌ها گردیده است، به طوری که با اضافه کردن ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد حجم کف به ملات پایه، مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها به ترتیب به ۱۳/۱، ۶/۰۴ و ۳/۱ مگاپاسکال تقلیل یافته است. بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰ درصد، دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه

مکعب نسبت به دانسیته طراحی بوده که نشانگر پایداری کافی کف در طی مراحل تولید بتن کفی می‌باشد [۲۹ و ۳۰].

### ۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری مخلوط‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همان گونه که از نتایج برمی‌آید، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط





شکل ۸. نتایج آزمایش جذب آب و جذب موئینه طرح مخلوطها  
**Fig. 8. Results of absorption and capillary absorption of various mixes**

جذب موئینگی که از شیب خط برازش شده در ناحیه خطی حاصل می‌شود، در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشانگر این است که وجود حباب‌های هوای ناشی از کف، منجر به کاهش جذب موئینگی شده که مؤید یافته‌های محققین قبلی می‌باشد [۲۱ و ۱۸]. جذب موئینه، علاوه بر حجم کلی حفرات موئین، متأثر از سایز حفرات، میزان اتصال آن‌ها و میزان پر پیچ و خم بودن مسیرهای عبور جریان می‌باشد. وجود حفرات کفی، منجر به کاهش حجم خمیر سیمان و به تبع، کاهش منافذ موئینه و افزایش پیچ و خم مسیرهای عبور جریان می‌گردد. همچنین مطرح شده است که حباب‌های کف به علت داشتن قطر بیشتر نسبت به حفرات موئینه، دارای مکش موئینه پائین تری هستند که با افزایش درصد کف، قطر حفرات هوا افزایش یافته و مکش آن‌ها کمتر می‌گردد که این امر منجر به کاهش بیشتر جذب آب موئینه می‌شود [۳۱].

همانطور که در شکل ۷ و جدول ۴ نشان داده شده است، بتن کفی سازه‌ای دارای کمترین مقدار ضریب جذب موئینگی می‌باشد. هر چند حجم خمیر سیمان در این مخلوط بیشتر از بتن کفی با ۵۰ درصد کف می‌باشد، ولی نسبت آب به سیمان کمتر این مخلوط، منجر به کاهش حجم منافذ موئینه و پر پیچ و خم شدن مسیرهای جریان گردیده است.

### ۳-۵- جذب آب و تخلخل

نتایج جذب آب وزنی و حجمی طرح مخلوطها، در جدول ۴ نشان

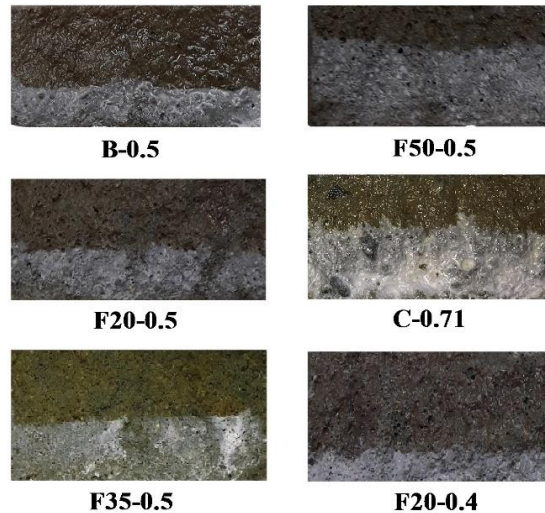
۲۴/۶ مگاپاسکال است که کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش نسبت سنگدانه به سیمان، منجر به افزایش ۸۸ درصدی مقاومت فشاری نسبت به بتن کفی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و حجم کف مشابه شده است. در همین سن، مقاومت فشاری بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۷۱، ۲۵/۲ مگاپاسکال می‌باشد. مشابه بودن مقاومت فشاری بتن معمولی با بتن کفی سازه‌ای، امکان مقایسه عملکرد آن‌ها بر اساس مقاومت یکسان را فراهم می‌نماید.

### ۳-۳- بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی

شکل ۶، تصاویر حاصله از میکروسکوپ SEM با بزرگنمایی ۳۰ برابر، از نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و با درصد‌های کف ۲۰، ۳۵ و ۵۰ را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد کف، قطر حباب‌های هوا افزایش و فاصله بین آن‌ها کاهش یافته است. همچنین تعداد ریزترک‌ها در دیواره حفرات و میزان حباب‌های ادغام شده با یکدیگر افزایش یافته که می‌تواند باعث افزایش نفوذ پذیری گردد.

### ۳-۴- جذب آب موئینه

نتایج حاصل از آزمایش جذب موئینه که بیانگر حجم آب جذب شده در طول زمان به ازای واحد سطح مقطع نمونه که در تماس با آب می‌باشد، در شکل ۷ نشان داده شده است. ضریب



شکل ۹. مقادیر نفوذ یون کلرید در پایان آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلرید  
**Fig. 9. Chloride profiles of split specimens after the RCMT test**

بین تخلخل کلی و ظاهری می بایست بیانگر میزان درصد هوای ناشی از کف باشد؛ اما همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، تفاوتی بین این عدد و درصد هوای هر طرح وجود دارد، که این تفاوت توسط محققین پیشین نیز مشاهده شده و بیانگر پر شدن درصدی از حفرات کفی توسط آب می باشد [۱۸ و ۱۶]. از آنجایی که فرآیند جذب آب توسط مستغرق شدن نمونه خشک در آب صورت می پذیرد، درصدی از حفرات هوا توسط هد آب موجود پر شده اند.

### ۳-۶- ضریب انتشار یون کلرید در آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT)

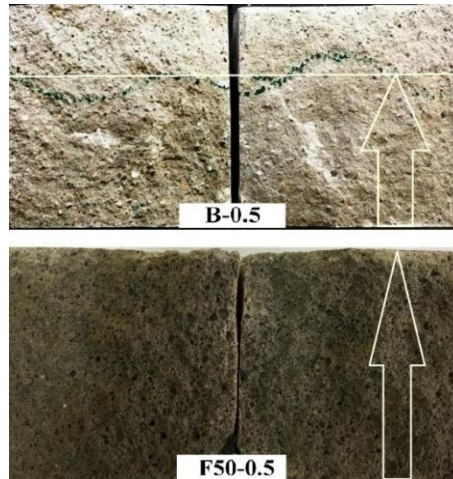
مقادیر نفوذ یون کلرید در آزمونهای مختلف در اثر پاشش نیترات نقره بر سطح شکسته شده آنها و تغییر رنگ حاصله در شکل ۹ ارائه شده است. با استفاده از میانگین عمق نفوذ یون کلرید در آزمونها و بر اساس روش ذکر شده در NT Build ۴۹۲ [۲۸] ضرایب انتشار یون کلرید محاسبه گردید، که نتایج در جدول ۴ و شکل ۱۰ ارائه شده اند.

نتایج بیانگر این است که افزودن کف، منجر به افزایش ضریب انتشار یون کلرید در بتن کفی نسبت به مخلوط پایه با نسبت آب به سیمان برابر می شود و با افزایش مقدار کف، مقدار افزایش در ضریب انتشار بیشتر می گردد. شایان توجه است که این روند در تضاد با نتایج آزمایش های مکش موئینه و جذب آب می باشد. در شکل ۱۰ نتایج

داده شده است. تعیین جذب آب به صورت درصد حجمی، امکان مقایسه واقعی تری در ارزیابی عملکرد بتن فراهم می نماید، به ویژه هنگامی که بتن های با دانسیته متفاوت مورد ارزیابی قرار می گیرند [۱۸ و ۱۶]. میزان جذب آب، نمایانگر حفرات قابل دسترس توسط آب می باشد، که عمدتاً شامل حفرات ژلی و موئینه می باشد. جذب آب حجمی بتن، بیانگر تخلخل ظاهری بتن می باشد که در آن، حفرات هوای منفک، در میزان جذب آب مشارکت ندارند.

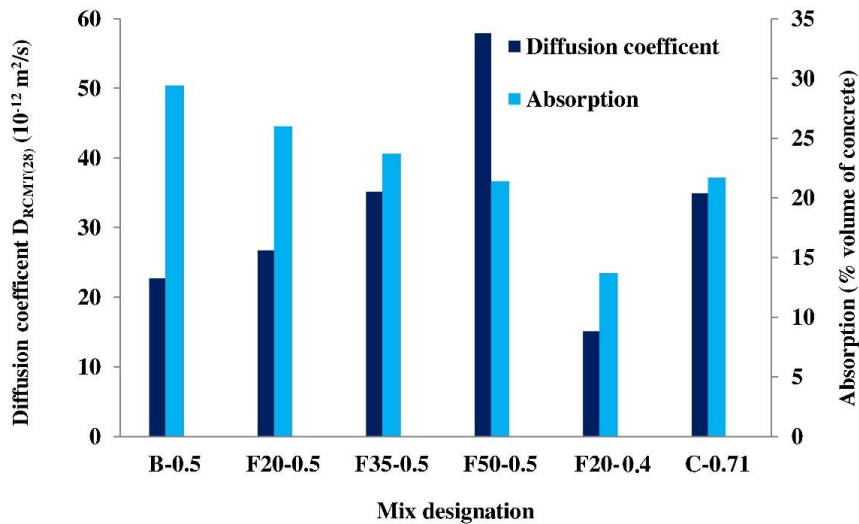
در شکل ۸ جذب آب حجمی مخلوطها در مقابل ضریب جذب موئینگی نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که افزودن حفرات هوای ناشی از کف به ملات پایه، منجر به کاهش جذب آب حجمی بتن می گردد که روند مشابهی با نتایج جذب موئینه دارد. مقدار کاهش در جذب آب، با افزایش حجم کف در بتن کفی بیشتر شده و مخلوط حاوی ۵۰ درصد کف در مقایسه با مخلوط پایه و مخلوطهای حاوی ۲۰ و ۳۵ درصد کف، عملکرد بهتری داشته است. دلیل عمده کاهش در جذب آب با افزایش مقدار کف مخلوط، کاهش حجم خمیر سیمان می باشد. بتن کفی سازه ای به علت پایین بودن نسبت آب به سیمان و میزان کم خمیر سیمان، کمترین مقدار جذب آب در بین مخلوطها را داراست.

نتایج تخلخل کلی نمونهها تحت آزمایش خلأ در جدول ۴ نشان داده شده است. تخلخل کلی بتن کفی، شامل تخلخل موجود در خمیر سیمان (ژلی و موئینه) و تخلخل ناشی از کف می باشد. تفاوت



شکل ۱۱. ارتفاع صعود موئینگی در پایان آزمایش

Fig. 11. The height of the capillary absorption at the end of the test



شکل ۱۰. مقایسه ضریب انتشار یون کلرید به دست آمده از آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید با درصد جذب آب حجمی مخلوطها

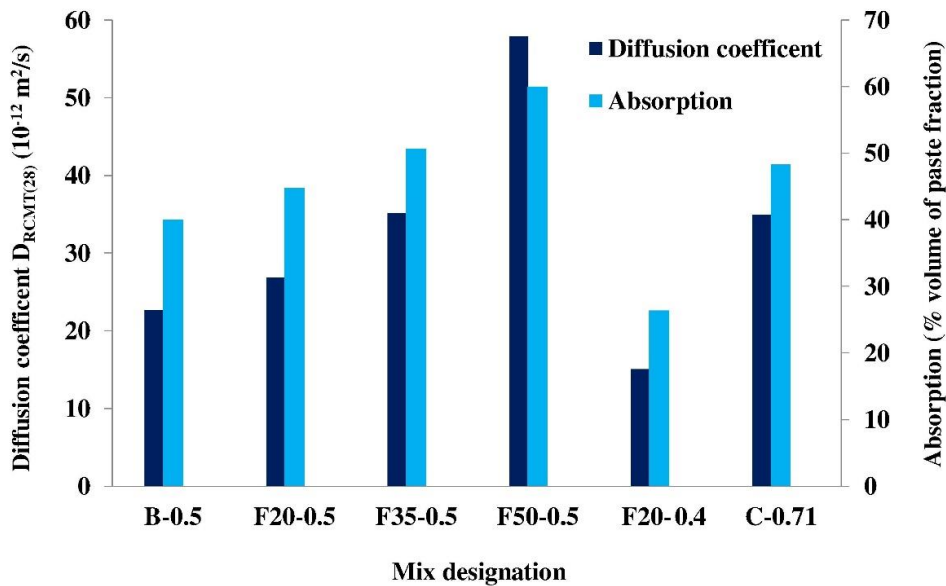
Fig. 10. Comparison of chloride diffusion coefficient derived from the RCMT test ( $D_{RCMT(28)}$ ) with water absorption of concrete

متصل به یکدیگر، دارای ضریب انتشار بالاتری نسبت به مخلوط پایه است.

۳-۷- تفسیر اثر متضاد مقدار کف روی نتایج آزمایش‌های جذب موئینه و جذب حجمی با نتایج آزمایش ضریب انتشار یون کلرید بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در بخش‌های قبل، مشخص شد که تخلخل کفی باعث کاهش مکش موئینه و جذب آب می‌گردد؛ در صورتی که اثر آن روی ضریب انتشار منفی بوده و باعث افزایش آن

آزمایش جذب آب حجمی برای مقایسه با نتایج ضریب انتشار ارائه شده است. اثر متضاد افزایش مقدار کف روی جذب آب و ضریب انتشار مخلوطها در نسبت برابر آب به سیمان، مشهود است. در بخش ۳-۷ به این تضاد پرداخته می‌شود.

ضریب انتشار یون کلرید بتن کفی سازه‌ای به علت پائین بودن نسبت آب به سیمان و محدود بودن مقدار کف نسبت به دیگر مخلوطها، پایین تر بوده است. بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۷۱ به علت بالا بودن نسبت آب به سیمان و وجود منافذ موئینه



شکل ۱۲. مقایسه ضریب انتشار یون کلرید به دست آمده از آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید با جذب آب حجمی خمیر سیمان  
**Fig. 12. Comparison of chloride diffusion coefficient derived from the RCMT test ( $D_{RCMT(28)}$ ) with water absorption of paste fraction**

به داخل آزمون کاهش می‌یابد. از این روش منطقی برای ارزیابی نتایج آزمایش جذب آب، بیان نتایج، به صورت آب جذب شده نسبت به حجم خمیر سیمان می‌باشد.

در شکل ۱۲ نتایج آزمایش جذب آب به صورت مقدار آب جذب شده نسبت به حجم خمیر سیمان ارائه شده و با نتایج آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش حجم کف، جذب آب نسبت به حجم خمیر سیمان افزایش می‌یابد که اکنون با روند نشان داده شده توسط آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید مطابقت دارد. شایان ذکر است که هر چند کیفیت خمیر سیمان در تمامی مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ یکسان است ولی پر شدن درصدی از حفرات کفی با آب در حین استغراق، منجر به افزایش جذب آب حجمی نسبت به حجم خمیر سیمان می‌شود. همچنین طی آماده‌سازی آزمون‌ها توسط استغراق برای آزمایش RCMT با افزایش حجم کف، درصد حفرات پر شده توسط آب افزایش یافته و در نتیجه، باعث افزایش ضریب انتشار یون کلرید می‌گردد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر تخلخل ناشی از کف روی خواص جذب آب

می‌شود. ورود یون کلرید به بتن عمدتاً از طریق منافذ موئینه در خمیر سیمان صورت می‌گیرد. در آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید، عمقی از آزمون که غلظت یون کلرید در منافذ خمیر سیمان به حد مشخصی رسیده باشد، تعیین می‌شود؛ لیکن در آزمایش مکش موئینه، نتیجه آزمایش به صورت مقدار آب جذب شده به ازای سطح مقطع آزمون بتنی محاسبه می‌گردد. در مخلوط‌های بتن کفی، با توجه به کاهش حجم خمیر سیمان، مقدار آب مکیده شده به داخل آزمون کاهش می‌یابد؛ در حالی که مقدار آب وارد شده در فاز خمیر سیمان، الزاماً کاهش نیافته است. بر این اساس، شی و همکاران [۲۱] مقایسه ارتفاع آب نفوذ کرده را روش مناسب‌تری برای مقایسه عملکرد جذب موئینه مخلوط‌های بتن کفی دانسته‌اند. در شکل ۱۱، ارتفاع آب ناشی از مکش موئین در مخلوط پایه و مخلوط حاوی ۵۰ درصد کف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، ادغام کف در مخلوط باعث افزایش ارتفاع آب جذب شده است که با روند مشاهده شده برای ضریب انتشار مطابقت دارد.

در آزمایش جذب آب نیز، آب جذب شده عمدتاً وارد منافذ موئینه می‌گردد؛ اما نتایج آزمایش به صورت حجم آب جذب شده به ازای حجم کل بتن بیان می‌گردد. در بتن کفی با افزایش حجم کف، حجم خمیر سیمان کاهش می‌یابد و لذا حجم آب جذب شده

## مراجع

- [1] R.C. Valore, Cellular concretes Part 2 physical properties, in: Journal Proceedings, 1954, pp. 817-836.
- [2] K. Ramamurthy, E.K. Nambiar, G.I.S. Ranjani, A classification of studies on properties of foam concrete, Cement and concrete composites, 31(6) (2009) 388-396.
- [3] Y.M. Amran, N. Farzadnia, A.A. Ali, Properties and applications of foamed concrete; a review, Construction and Building Materials, 101 (2015) 990-1005.
- [4] A. Bagheri, S. Samea, Role of non-reactive powder in strength enhancement of foamed concrete, Construction and Building Materials, 203 (2019) 134-145.
- [5] C. Bing, W. Zhen, L. Ning, Experimental research on properties of high-strength foamed concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 24(1) (2011) 113-118.
- [6] A. Bagheri, S. Samea, Parameters Influencing the Stability of Foamed Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 30(6) (2018) 04018091.
- [7] A.A. Hilal, N.H. Thom, A.R. Dawson, On entrained pore size distribution of foamed concrete, Construction and Building Materials, 75 (2015) 227-233.
- [8] M. Jones, A. McCarthy, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, Magazine of concrete research, 57(1) (2005) 21-31.
- [9] Y. Fu, X. Wang, L. Wang, Y. Li, Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review, Advances in Materials Science and Engineering, 2020 (2020).
- [10] M. Jones, A. McCarthy, Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete, Fuel, 84(11) (2005) 1398-1409.
- [11] L.Y. Loon, A.M.A. Zaidi, K.H. Boon, S. Sulaiman, S.H. Adnan, I. Rahman, Carbonation and Water Permeability of Foamed Concrete, International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 1(1) (2010) 33-46.
- [12] E. Namson, G. Šahmenko, A. Korjakins, Durability properties of high performance foamed concrete, Procedia Engineering, 172 (2017) 760-767.
- [13] N.S. Martys, C.F. Ferraris, Capillary transport in mortars and concrete, Cement and concrete research, 27(5) (1997)

جذب موئینه و نفوذ یون کلرید در بتن های کفی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله به شرح ذیل می باشد:

ایجاد تخلخل ناشی از ادغام کف در مخلوط پایه، با حفظ نسبت آب به سیمان، منجر به کاهش جذب آب حجمی و جذب موئینه بتن کفی حاصله می گردد و با افزایش حجم کف، مقدار بهبود در این پارامترها بیشتر می شود. اگر چه این روند، ممکن است عملکرد مناسب بتن کفی در برابر نفوذ عوامل مهاجم را القا نماید ولی نتایج آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید، روندی مغایر با روند نتایج جذب آب نشان می دهد. مغایرت مشاهده شده، ناشی از نحوه معمول محاسبه نتایج آزمایش های جذب آب و جذب موئینه می باشد که حجم آب جذب شده را نسبت به حجم کل آزمون یا تمامی سطح مقطع در تماس با آب آزمون می سنجند. با توجه به اینکه نفوذ آب و مواد مهاجم محلول در آن عمدتاً از طریق منافذ موئینه موجود در خمیر سیمان صورت می گیرد، با در نظر گرفتن نتایج آزمایش های جذب بر اساس حجم خمیر سیمان، روند نتایج این آزمایش ها تغییر کرده و مشابه با نتایج ضریب انتشار یون کلرید می گردد.

درصدی از حفرات کفی، به علت هد آب موجود در هنگام مستغرق شدن، توسط آب پر می شود که با افزایش حجم کف، درصد آن ها افزایش می یابد و منجر به افزایش مقادیر جذب و انتشار می گردد. افزایش حجم کف، منجر به افزایش قطر حباب های هوا، کاهش فاصله موثر بین آن ها و ادغام بخشی از حباب های کفی با یکدیگر می شود.

علی رغم اثر منفی حباب های کفی روی خواص جذب آب و ضریب انتشار یون کلرید، نتایج نشانگر این است که بتن کفی سازه ای به علت نسبت آب به سیمان کمتر و محدود بودن حجم کف ادغامی، عملکردی در حد مخلوط پایه و حتی بهتر از آن داشته است، همچنین در مقایسه با بتن معمولی در مقاومت برابر، دارای عملکرد بهتری بوده است.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله قدردانی خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بابت حمایت مالی جهت انجام پژوهش گزارش شده، ابراز می دارند.



- concrete, TRL Limited Crowthorne, UK, 2001.
- [23] ASTM C150, Standard specification for Portland cement, Annual book of ASTM standards, 4 (2002).
- [24] ASTM C796, Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam, Annual book of ASTM standards, 4 (2012).
- [25] BS EN 12390-3, Standard, Testing hardened concrete, Compressive Strength of Test Specimens, (2009) 12390-12393.
- [26] RILEM CPC-11.2, Absorption of Water by Concrete by Capillarity, RILEM Technical Recommendation for Testing and use of Construction Materials, (1994).
- [27] E. Kearsley, P. Wainwright, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, Cement and concrete research, 32(2) (2002) 233-239.
- [28] NT Build 492, Nordtest method for chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Espoo, Finland, (1999).
- [29] ASTM C869, Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete, Annual book of ASTM standards, 5 (2011).
- [30] E. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, Fresh state characteristics of foam concrete, Journal of materials in civil engineering, 20(2) (2008) 111-117.
- [31] H. Wong, A. Pappas, R. Zimmerman, N. Buenfeld, Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete, Cement and Concrete Research, 41(10) (2011) 1067-1077.
- 747-760.
- [14] M.H. Medeiros, P. Helene, Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption, Construction and building materials, 23(3) (2009) 1476-1484.
- [15] S. Zhang, L. Zong, Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials, Advances in Materials Science and Engineering, 2014 (2014).
- [16] A.A. Hilal, N.H. Thom, A.R. Dawson, Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 12(12) (2014) 535-544.
- [17] E. Kearsley, P. Wainwright, Porosity and permeability of foamed concrete, Cement and concrete research, 31(5) (2001) 805-812.
- [18] E.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Sorption characteristics of foam concrete, Cement and concrete research, 37(9) (2007) 1341-1347.
- [19] L. Cox, S. Van Dijk, Foam concrete: a different kind of mix, Concrete, 36(2) (2002).
- [20] D. Panesar, Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, Construction and building materials, 44 (2013) 575-584.
- [21] W. She, Y. Zhang, C. Miao, J. Hong, S. Mu, Water transport in foam concrete: visualisation and numerical modelling, Magazine of Concrete Research, (2019) 1-13.
- [22] K. Brady, G. Watts, M.R. Jones, Specification for foamed

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Bagheri , M. M. Rastegar, Investigation of foam volume on the penetration parameters of foamed concrete , Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4291-4304.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18311.6828](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18311.6828)

