

## بررسی تأثیر حجم کف در ویژگی‌های منافذ تشکیل شده و مقاومت الکتریکی بتن‌های کفی

محمد مهدی رستگار \*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

ابراهیم قیاسوند

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

### چکیده

در این پژوهش، تأثیر حجم تخلخل ناشی از کف روی ساختار منافذ و مقاومت الکتریکی بتن‌های کفی، بررسی شده است. ساختار منافذ شامل متوسط قطر حفرات کفی، اندازه حفرات و فاصله آن‌ها از یکدیگر در مخلوط‌های بتن کفی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و میزان کف صفر، ۲۰ و ۳۵ درصد و همچنین بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰ درصد مقایسه شده است. تصاویر نمونه‌های بتن کفی در آزمایش *SEM* و آنالیز تصویری آن‌ها توسط میکروسکوپ نوری و نرم‌افزار، تأییدکننده یکدیگر بوده و نتایج، بیانگر آن است که با افزایش تخلخل کفی، میانگین قطر حباب‌های هوا افزایش و فاصله بین آن‌ها کاهش یافته است. همچنین تعداد ریز ترک‌ها در دیواره حفرات و میزان حباب‌های ادغام‌شده با یکدیگر افزایش یافته که می‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری گردد. حفرات هوای غیر اشباع و منفک نیز در داخل بتن مشابه سنگ‌دانه عمل نموده و هدایت الکتریکی بتن را کاهش می‌دهد. از آنجایی که مسیر انتقال جریان الکتریکی از طریق حفرات موئینه صورت می‌گیرد لذا با افزایش حجم کف، حجم خمیر سیمان و به تبع، حجم کل حفرات موئینه کاهش می‌یابد. همچنین کاهش نسبت آب به سیمان باعث کاهش قطر و حجم کلی حفرات موئینه می‌گردد و در نتیجه مقاومت الکتریکی بتن افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش درصد حفرات کفی، تا جایی که منجر به ادغام حفرات و وجود ریز ترک و سوراخ درون حباب نگردند، بتن‌های کفی عملکرد بهتری در زمینه دوام از خود نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بتن کفی، حجم کف، تخلخل، مقاومت الکتریکی، آنالیز تصویری.

## ۱- مقدمه

عامل ریز ساختار منافذ و ترکیبات شیمیایی مایع منفذی بستگی دارد [۱۴]. علاوه بر آن، مقاومت الکتریکی بتن وابسته به رطوبت نسبی محیط و درجه اشباع بودن حفرات هوای محبوس در آن نیز است. طی چند دهه گذشته، توجه زیادی به تحقیق و توسعه تکنیک‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری غیر مخرب برای دوام سازه‌های بتنی شده است [۱۵]. با توجه اینکه مقاومت الکتریکی سنگ‌دانه نسبت به خمیر سیمان بسیار بیشتر است، لذا هر عاملی که منجر به کاهش حجم خمیر سیمان در مخلوط شود، باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌گردد [۱۶]. براساس مطالعات شیبانی و تدین [۱۷]، با افزایش هوای کل بتن از دو به شش درصد مقاومت ویژه الکتریکی به علت نارسایی حباب هوا ناشی از استفاده مواد حباب‌زا افزایش می‌یابد. درضمن مطالعات اخیر کامل و همکاران [۱۸] روی تأثیر مواد افزودنی حباب‌زا بر نفوذپذیری و دوام بتن ساخته‌یاز شده با سیمان پرتلند، نشان داده است که افزایش درصد هوای محبوس در بتن از ۱/۹ تا ۱۳/۴ درصد، موجب افت ناچیزی در شاخص مقاومت ویژه الکتریکی بتن می‌گردد.

ریز ساختار مخلوط‌های بتن کفی به لحاظ منفصل و یا مرتبط بودن حفرات ناشی از کف، می‌تواند روی پارامترهای دوام آن‌ها اثرگذار باشد. با توجه به اینکه دوام بتن متأثر از عمق نفوذ آب و یون‌های مهاجم محلول در آن است [۱۲]، لذا ضروری است اثر مکانیزم‌های مختلف نفوذ در دوام بتن‌های کفی بررسی گردد. پارامترهایی نظیر ساختار منافذ، میزان رطوبت و شرایط مرزی بر انتقال مایعات درون بتن حکم فرماست.

جذب آب از مهم‌ترین مکانیزم‌های نفوذ عوامل مهاجم به داخل بتن محسوب می‌گردد [۱۹-۲۱]. تأثیر میزان تخلخل ناشی از کف، در جذب آب بتن کفی توسط برخی از محققان بررسی شده است. در این پژوهش‌ها، جرم واحد حجم کمتر بتن کفی در مقایسه با بتن معمول، باعث می‌شود جذب آب آن بر حسب درصد وزنی، اعداد بزرگتری را در مقایسه با بتن معمولی نشان دهند. لذا مقایسه نتایج به‌صورت درصد وزنی، گمراه‌کننده است و تعیین جذب آب به‌صورت درصد حجمی، امکان مقایسه واقعی‌تری را با مقادیر مربوط به بتن معمولی فراهم می‌نماید [۱۹-۲۱]. کرسلی<sup>۱</sup> و

یکی از انواع بتن‌های سبک، بتن کفی است که از ترکیب حباب‌های ریز با خمیر سیمان و یا ملات ایجاد می‌گردد [۱-۳]. از مزیت‌های این بتن می‌توان به هزینه کم، سبکی، عایق‌بندی حرارتی و عدم نیاز آن به سنگ‌دانه‌های سبک اشاره نمود [۳-۵]. استفاده از این نوع بتن‌ها در ابتدا به‌عنوان عایق و مصالح پرکننده بوده است، ولی اکنون با پیشرفت تکنولوژی، ساخت بتن‌های کفی پایدار با مقاومت بالا، زمینه‌ساز بستری مناسب جهت تولید بتن‌های کفی با مقاومت سازه‌ای و نیمه‌سازه‌ای گردیده است [۵-۸]. عمده تحقیق‌های قبلی انجام‌شده در خصوص بتن‌های کفی در رابطه با خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بوده و دوام این نوع بتن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۲، ۳، ۹].

توسعه کاربرد بتن‌های کفی برای اهداف سازه‌ای، مستلزم استفاده از آرماتور در این نوع بتن‌ها بوده، لذا مباحث مرتبط با دوام در برابر خوردگی آرماتور، با توجه به حضور درصد فراوان کف در مجاورت آرماتور و بررسی ریزساختار بتن‌های کفی حائز اهمیت است [۱۰].

مطالعه دوام بتن در مواجهه با محیط‌های تهاجمی حائز اهمیت است. این محیط‌ها ممکن است در حالت مایع و یا گازی وجود داشته باشند و یا توسط مکانیزم‌های مختلفی مانند نفوذ، انتشار، جذب، مکش موئینه و یا ترکیبی از موارد مذکور منتقل شوند. بنابراین انتقال یون‌ها از طریق ریز ساختارهای موجود در بتن، نقش مهمی در کنترل دوام بتن دارد [۱۱، ۱۲]. از بین محیط‌های مخرب، دو پدیده نفوذ کلرید و خوردگی به‌عنوان فرایندهای اصلی تخریب بتن شناخته شده و از اهمیت بیشتری نسبت به بقیه عوامل مخرب برخوردارند.

مقاومت الکتریکی به‌عنوان شاخصه‌ای که توانایی و مقاومت بتن در برابر انتقال یون‌های باردار را ارزیابی می‌کند، می‌تواند به شکل غیر مستقیم، شدت فرایند خوردگی را مورد ارزیابی قرار دهد. مطالعات نشان داده است که در بتن معمولی با مقاومت الکتریکی کم، در مقایسه با بتن با مقاومت الکتریکی بالا که در آن جریان به آسانی بین نواحی آندی و کاتدی عبور نمی‌کند، فرایند خوردگی سریع خواهد بود [۱۳]. درضمن مقاومت الکتریکی بتن، به هر دو

<sup>1</sup> Kearsley

## ۲- برنامه آزمایش

### ۲-۱- مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱- سیمان

سیمان پرتلند تیپ ۱ مطابق با الزامات *ASTM C150* [۲۵] با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات استاندارد برابر با ۴۰ مگاپاسکال و ترکیبات شیمیایی مطابق جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت.

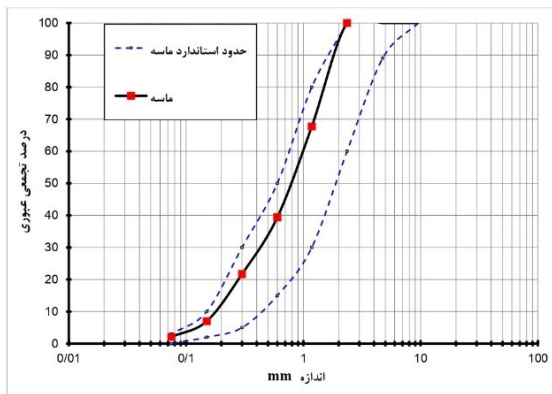
جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان

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
۲۱/۲	۴/۹	۳/۵	۶۳/۲	۳/۷	۰/۱۸
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
۰/۵۱	۲/۲	۵۳/۴	۲۰/۱	۶/۹	۱۰/۴

زمان گیرش اولیه و نهایی: ۱۴۰ و ۱۹۰ دقیقه

#### ۲-۱-۲- سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه مورد استفاده جهت تولید بتن کفی، ماسه نیمه شکسته با حداکثر اندازه ۲/۳۶ میلی‌متر بوده که به ترتیب دارای جذب آب و جرم مخصوص اشباع با سطح خشک ۲/۶۷ درصد و ۲۵۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه مورد استفاده در ساخت

مخلوط‌ها

#### ۲-۱-۳- عصاره کف

عصاره کف پروتئینی، مطابق با الزامات *ASTM C796* [۲۶] با

وینریت<sup>۱</sup> [۲۰] گزارش کرده‌اند که اثر حجم کف در مقادیر جذب آب حجمی بتن کفی، اندک است. کاکس<sup>۲</sup> و واندیک<sup>۳</sup> [۲۲] مقادیر جذب آب بتن‌های کفی را بالاتر از بتن‌های معمولی گزارش نموده‌اند. تحقیقاتی که توسط نامبیار<sup>۴</sup> و رامامورتی<sup>۵</sup> [۲۱] بر روی جذب آب بتن‌های کفی با حجم متفاوت کف، صورت گرفت، بیانگر قدری کاهش در جذب آب با افزایش حجم کف است. همچنین این محققان گزارش کرده‌اند که با افزایش حجم کف، جذب موئینه بتن‌های کفی کاهش می‌یابد. هلال<sup>۶</sup> و همکاران [۱۹] نیز اظهار داشته‌اند که با افزایش حجم کف، جذب آب کاهش می‌یابد. طبق نظر این محققان، تخلخل ناشی از کف، عمدتاً از هم مجزا بوده، لذا نقش اندکی در جذب آب ایفا می‌نمایند. تحقیقات اخیر که توسط شی<sup>۷</sup> و همکاران [۲۳] پیرامون جذب موئینه در بتن‌های کفی صورت گرفته، حاکی از کاهش جذب موئینه با افزایش حجم کف می‌باشد. از طرف دیگر، پدیده انتشار از مهم‌ترین مکانیزم‌های نفوذ یون کلرید به داخل بتن است. مطالعات آزمایشگاهی بریدی<sup>۸</sup> و همکاران [۲۴] 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 است. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی باقری و رستگار [۱۱]، [۱۲]، با افزایش حجم کف در نسبت آب به سیمان ثابت، جذب آب حجمی نسبت به حجم خمیر سیمان، عمق صعود موئینگی و ضریب انتشار یون کلرید افزایش یافته است. با توجه به محدود بودن بررسی‌های قبلی در خصوص ساختار منافذ کفی و تأثیر افزایش حجم کف بر روی آن‌ها و همچنین اهمیت مقاومت الکتریکی به‌عنوان یک تکنیک غیر مخرب، جهت ارزیابی بتن‌های کفی سازه‌ای و نیمه سازه‌ای در برابر خوردگی آرماتور، با توجه به درصد فراوان کف در مجاورت آن، در تحقیق حاضر، مطالعات آزمایشگاهی جهت دستیابی اطلاعات جدید در این زمینه صورت گرفته که جزئیات آن در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

<sup>5</sup> Ramamurthy

<sup>6</sup> Hilal

<sup>7</sup> She

<sup>8</sup> Brady

<sup>1</sup> Wainwright

<sup>2</sup> Cox

<sup>3</sup> Van Dijk

<sup>4</sup> Nambiar

مشخصات طرح مخلوط‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. از آنجائیکه حداقل حجم کف در ساخت بتن‌های کفی، ۲۰ درصد است، اعداد ۲۰ و ۳۵ درصد برای انجام این مطالعه در نظر گرفته شده است. کد اختصاص یافته برای مخلوط‌ها شامل یک حرف است که نوع مخلوط را نشان داده است ( $B$  ملات پایه فاقد کف و  $F$  بتن کفی). عددی که بلافاصله بعد از این حرف ذکر شده، نمایانگر درصد حجم کف و عدد بعد از خط تیره نیز نشان‌دهنده نسبت آب به سیمان می‌باشد، به عنوان مثال، کد  $F20-0.5$  معرف بتن کفی با حجم کف ۲۰ 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 روش پیش-کف‌زایی استفاده شده و کف مورد نیاز توسط دستگاه فوم ژنراتور در مقیاس آزمایشگاهی، مطابق شکل ۲-الف تهیه شده است. لازم به ذکر است که آب مصرف شده جهت تولید کف در نسبت آب به سیمان لحاظ نشده است.

جرم مخصوص ۱/۱۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و براساس 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.

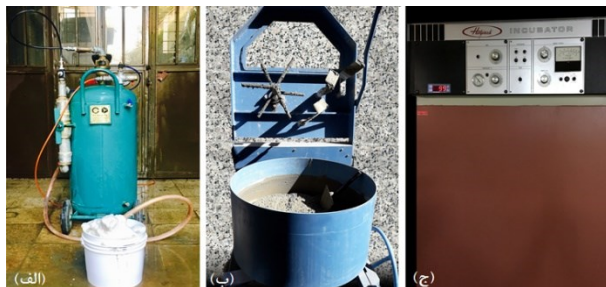
## ۲-۲- طرح مخلوط و شرایط ساخت و عمل آوری

جهت بررسی مستقیم اثر حجم کف بر ساختار منافذ و مقاومت الکتریکی بتن کفی، دو طرح مخلوط با نسبت‌های یکسان اجزای فاز ملات اما با حجم‌های متفاوت کف، شامل صفر، ۲۰ و ۳۵ درصد در نظر گرفته شده است. نسبت آب به سیمان و نسبت وزنی سنگ‌دانه به سیمان در این طرح مخلوط‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۱ است. بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰ درصد به منظور دستیابی به مقاومت سازه‌ای ساخته شدند که

جدول ۲- مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌ها

کد مخلوط	ماسه	آب	سیمان	نسبت وزنی سنگ‌دانه به سیمان	مقدار کف		نسبت آب به سیمان
					درصد	حجم خمیر سیمان مترمکعب	
B-0.5	۸۲۵	۴۱۳	۸۲۵	۱	۰	۰/۶۸	۰/۵
F20-0.5	۶۶۰	۳۳۰	۶۶۰	۱	۲۰	۰/۵۴	۰/۵
F35-0.5	۵۳۶	۲۶۸	۵۳۶	۱	۳۵	۰/۴۴	۰/۵
F20-0.4	۹۷۰	۲۳۴	۵۸۵	۱/۶۶	۲۰	۰/۴۲	۰/۴

حداقل ۹۵ درصد نگهداری و سپس از قالب خارج شده و متناسب با شرایط هر آزمایش تا سن مقرر نگهداری شده‌اند.



شکل ۲- تجهیزات مورد استفاده جهت ساخت و عمل آوری بتن کفی (الف) دستگاه فوم ژنراتور (ب) مخلوط‌کن (ج) انکوباتور

از آنجایی که در مرحله تولید کف، جرم مخصوص آن پس از ساخت اندازه‌گیری می‌شود، لذا با توجه به درصد کف در یک متر مکعب، وزن کف مورد استفاده برای ساخت هر طرح مخلوط برآورد می‌گردد.

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. از هر مخلوط متناسب با هر آزمایش، نمونه‌های لازم تهیه و به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور مطابق شکل ۲-ج با رطوبت

اثرگذار باشد. در تحقیق حاضر از میکروسوپ الکترونی روبشی برای بررسی وضعیت حفرات کفی استفاده گردید.

در میکروسکوپ الکترونی روبشی یا *Scanning electron microscope (SEM)* الکترون به سطح نمونه تابیده و منعکس می‌گردد و توسط آشکارساز جمع آوری می‌شود، آنگاه تبدیل به فوتون نوری می‌گردد تا تصویر مرئی ایجاد شود. به عبارت دیگر این نوع میکروسکوپ فقط از ساختار سطحی تصویر می‌دهد. الکترون برخلاف نور نمی‌تواند به آسانی در هوا حرکت کند، در نتیجه باید در مسیر حرکت الکترون و محفظه نمونه، خلاء بسیار قوی ایجاد نمود. به علت خلاء بسیار قوی در محفظه نمونه، نمونه‌ها باید کاملاً خشک شده باشند از این رو آماده‌سازی نمونه‌های بتنی از اهمیت بسزایی برخوردار است. بدین منظور پس از خشک شدن نمونه، سطوح جانبی آن با چسب اپوکسی پوشانده شده و توسط دستگاه *Sputter coater* (شکل ۴- الف) لایه‌ای از طلا به ضخامت حدود ۳۰ نانومتر به منظور حرکت آزادانه الکترون روی سطح نمونه پوشانده شد و نمونه آماده انجام آزمایش گردید. بررسی قطر حفرات هوا، فاصله آن‌ها و احتمال وجود ریز ترک یا حفره در جدار حباب هوا برای مخلوط‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵ و درصد کف ۲۰ و ۳۵ و هم‌چنین با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و درصد کف ۲۰ درصد توسط دستگاه *SEM* مدل *JEOL (JSM-840A)* (شکل ۴- ب) صورت گرفت.



(الف) (ب)

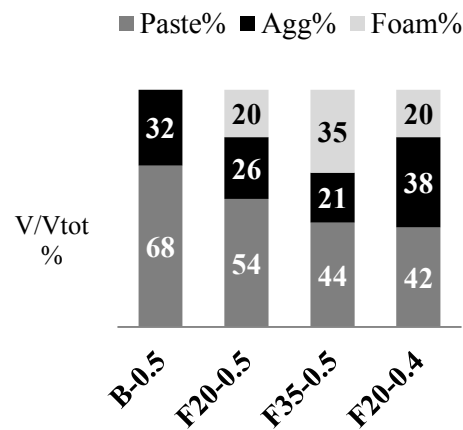
شکل ۴- الف) دستگاه مورد استفاده جهت پوشش لایه طلا روی سطح نمونه، ب) دستگاه *SEM*

### ۲-۳-۵- تصویربرداری میکروسکوپی و آنالیز تصویری

یک دوربین نصب شده بر روی یک میکروسکوپ نوری و یک کامپیوتر دارای نرم افزار آنالیز تصویری، برای تعیین کمیت ساختار تخلخل ناشی از کف در مخلوط‌های بتن کفی سخت شده از نظر توزیع اندازه منافذ استفاده شد.

روش به کار گرفته شده در تحقیق فعلی برای تعیین ویژگی‌های

درصد‌های حجم سنگ‌دانه، خمیر سیمان و کف در یک مترمکعب برای هر طرح مخلوط در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- درصد حجم خمیر سیمان، سنگ‌دانه و کف در یک مترمکعب برای مخلوط‌های مورد بررسی

### ۲-۳-۳- آزمایش‌های انجام شده

#### ۱-۳-۲- تعیین جرم مخصوص کف

جرم مخصوص کف تولیدشده، مطابق با استاندارد *ASTM C 796* [۲۶] اندازه‌گیری شده است.

#### ۲-۳-۲- تعیین دانسیته بتن تازه

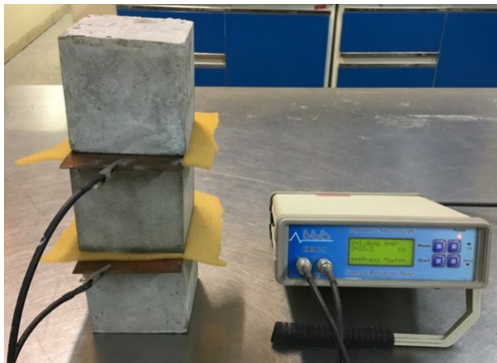
جرم مخصوص بتن کفی مطابق با روش ذکرشده در استاندارد *ASTM C 796* [۲۶] اندازه‌گیری شده است.

#### ۲-۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری هر مخلوط ساخته‌شده، از سه آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری مطابق با استاندارد *BS EN 12390-3* [۲۷] 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.

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

ریز ساختار مخلوط‌های بتن کفی به لحاظ منفصل و یا مرتبط بودن حفرات ناشی از کف، می‌تواند روی پارامترهای دوام آن‌ها



شکل ۵- تجهیزات مورد استفاده برای تعیین مقاومت الکتریکی

منافذ (تهیه قطعه، تصویربرداری و تجزیه و تحلیل تصویر) با روش به کار رفته در مراجع مختلف [۴، ۲۸-۳۰] قابل مقایسه است، که نشان دهنده مناسب بودن روش برای هدف مورد نظر است.

در این آزمایش، از قطعات  $25 \times 50 \times 50$  میلی‌متر مکعب استخراج شده از قسمت میانی نمونه مکعبی به ابعاد  $100$  میلی‌متر برای هر طرح مخلوط بتن کفی استفاده شد. عملیات زیر بر روی سطح قطعات بریده شده برای روشن شدن مرز بین حفره‌های هوا و ماتریس ملات انجام شد [۷، ۲۹].

- ساب زدن سطح نمونه و تمیز کردن آن با استفاده از هوای فشرده
- سیاه کردن سطح با استفاده از جوهر حاوی رنگ ماندگار
- خشک کردن قطعه در آون با دمای  $50$  درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت
- استفاده از پودر تالک سفید جهت پر کردن منافذ موجود در سطح نمونه
- از بین بردن پودر تالک روی سطح مشکی با استفاده از تیغ و یک انگشت چرب

شایان ذکر است، از آنجایی که نمونه‌ها با دستگاه برش توسط تیغه‌های ظریف الماس برش داده شده‌اند، به نظر نمی‌رسد برش نمونه بر ساختار منافذ کفی تأثیر بگذارد.

در مطالعه حاضر، از بزرگنمایی  $6/3$  استفاده شده و هر پیکسل در تصویر نشان دهنده  $19/9$  میکرومتر است. این انتخاب از این جهت بوده که در این مطالعه ساختار منافذ بزرگتر از  $20$  میکرومتر تعیین شده است. هر تصویر محدوده‌ای از  $19/7 \times 24/6$  میلی‌متر ( $484/6$  میلی‌متر مربع) از قطعات  $25 \times 50 \times 50$  میلی‌متر را پوشش می‌دهد. در نهایت، توزیع اندازه منافذ برای مخلوط‌های انتخاب شده پس از تجزیه و تحلیل نرم افزاری تصاویر، تعیین شده است.

### ۲-۳-۶- آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن

جهت انجام این آزمایش، از هر طرح مخلوط، سه نمونه مکعبی  $100$  میلی‌متری تهیه شده است. نمونه‌ها پس از بیرون آمدن از قالب، درون انکوباتور با رطوبت حداقل  $95$  درصد قرار گرفته و در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز مطابق با شکل ۵ برابر با دستورالعمل انستیتو تحقیق و آزمایش ملی سوئد [۳۱]، توسط دو صفحه مسی در طرفین نمونه بتنی، مورد آزمایش قرار گرفته است.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

#### ۳-۱- جرم مخصوص بتن تازه

جرم مخصوص اندازه‌گیری شده مخلوط‌ها، بلافاصله پس از ساخت در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر در محدوده  $0,05$  کیلوگرم در مترمکعب نسبت به جرم مخصوص طراحی بوده که نشانگر پایداری کافی کف در طی مراحل تولید بتن کفی می‌باشد [۳۲-۳۴].

جدول ۳- مقادیر جرم مخصوص و مقاومت فشاری مخلوط‌ها

جرم مخصوص طراحی	جرم مخصوص اندازه‌گیری شده	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	کد مخلوط
		۷ ۲۸ ۹۰	روزه روزه روزه
۲۰۶۳	۲۰۸۱	۴۳/۳ ۳۶/۹ ۲۰/۴	B-0.5
۱۶۶۰	۱۶۴۸	۱۶/۸ ۱۳/۱ ۸	F20-0.5
۱۳۵۹	۱۳۷۱	۸/۱ ۶ ۳/۵	F35-0.5
۱۷۹۹	۱۷۸۵	۲۹/۷ ۲۴/۶ ۲۱/۲	F20-0.4

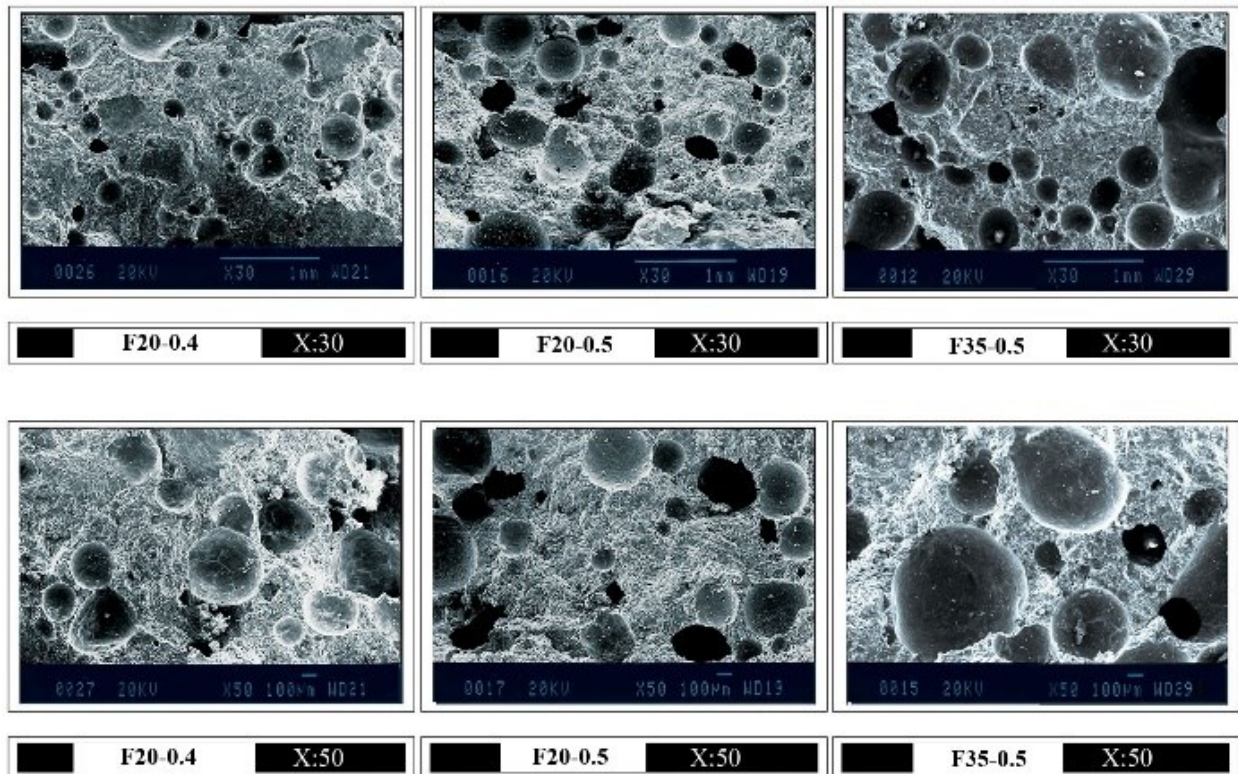
### ۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری مخلوط‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همانگونه که از نتایج برمی‌آید، مقاومت فشاری  $28$  روزه مخلوط پایه  $36/9$  مگاپاسکال است که افزایش حجم کف به آن، منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت نمونه‌ها گردیده است، به طوری که با اضافه کردن  $20$  و  $35$  درصد حجم کف به ملات پایه، مقادیر مقاومت فشاری  $28$  روزه آن‌ها به ترتیب به  $13/1$  و  $6/04$  مگاپاسکال تقلیل یافته است. بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان  $0/4$  و حجم کف  $20$  درصد، دارای مقاومت فشاری  $28$  روزه  $24/6$

۳۰ و ۵۰ برابر، از نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و با درصد‌های کف ۲۰ و ۳۵ و همچنین بتن کفی سازه‌ای با درصد کف ۲۰ درصد را نشان داده شده است. همانگونه که در این 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 ادغام‌شده با یکدیگر افزایش یافته که می‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری گردد.

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.

**۳-۳- بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی**  
در شکل ۶، تصاویر حاصله از میکروسکوپ SEM با بزرگنمایی



شکل ۶- تصاویر SEM مخلوط‌های بتن کفی با بزرگنمایی ۳۰ و ۵۰ برابر

از ۰/۵ به ۰/۴ قطر متوسط حفرات از ۱۰۷ به ۸۸/۲ میکرومتر کاهش می‌یابد.

**۳-۴- آنالیز تصویری تصاویر میکروسکوپی**  
شکل ۷، تصاویر نمونه‌های آماده‌سازی شده بتن کفی با مقادیر مختلف کف و نمودار توزیع اندازه حباب‌های ناشی از کف در مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر این، مقادیر میانگین تخلخل در حجم بتن و توزیع اندازه حباب‌های هوا (D90, D50) که از آنالیز تصویری نمونه‌ها توسط نرم افزار Clemex به دست آمده در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج موجود در این جدول برمی‌آید، با افزایش حجم کف در یک نسبت آب به سیمان ثابت، قطر متوسط حفرات D50 از ۱۰۷ به ۱۹۱/۴ میکرومتر افزایش یافته و در حجم کف ثابت با کاهش نسبت آب به سیمان

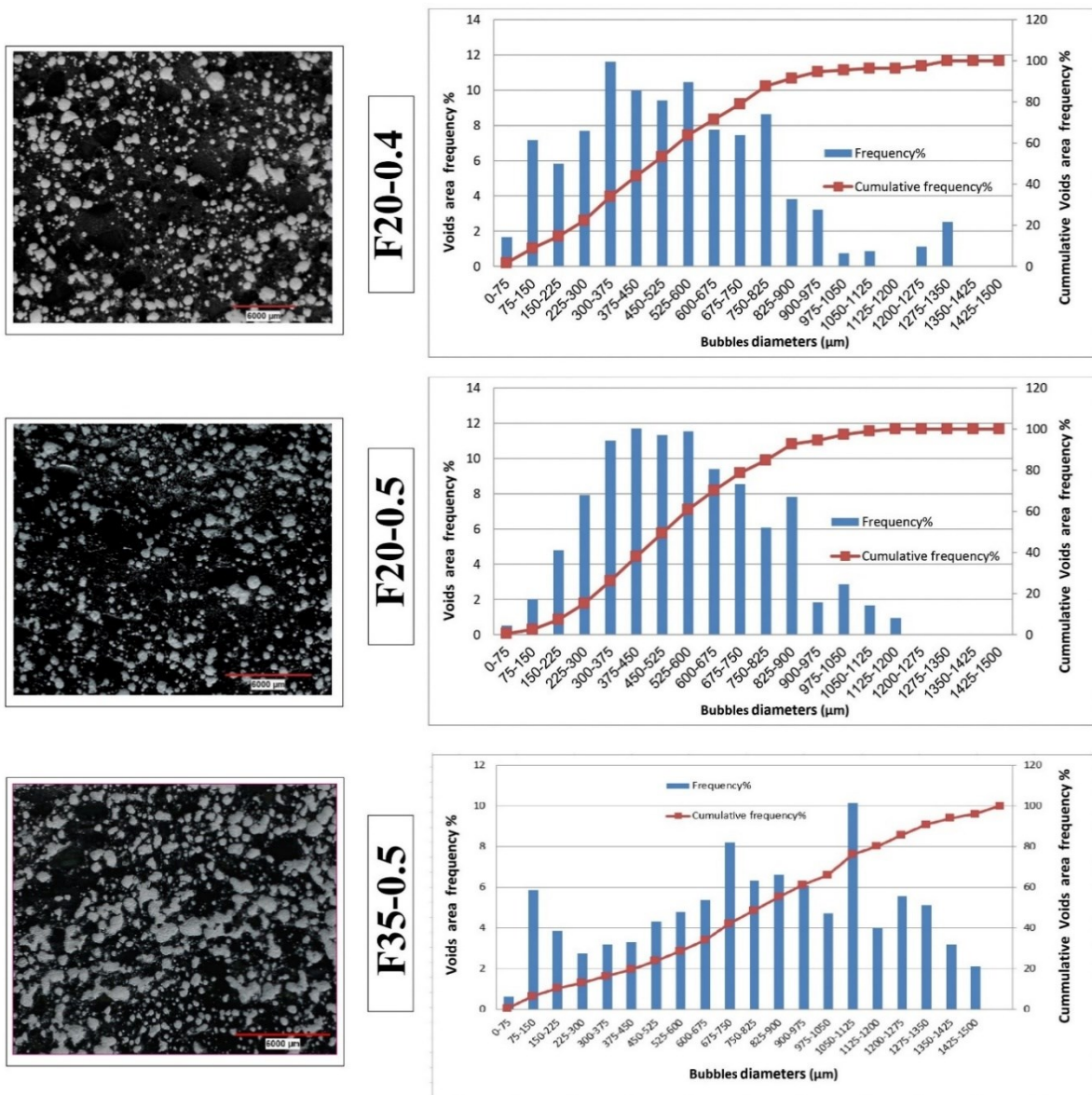
جدول ۴- نتایج بدست آمده از آنالیز تصویری نمونه‌ها

کد مخلوط	تخلخل کلی بتن (%)	D50(μm)	D90(μm)
F20-0.5	۲۰/۳۱	۱۰۷	۵۳۳/۷
F35-0.5	۳۵/۴۵	۱۹۱/۴	۷۱۵/۷
F20-0.4	۲۱/۲۸	۸۸/۲	۳۷۹

D50: قطر متوسط حفرات هوا

D90: قطری که ۱۰ درصد حفرات هوا از آن بیشتر هستند

پارامتر D50 و D90 به ترتیب قطر متوسط حفرات هوا در تصویر آنالیز شده و قطری که ۱۰ درصد حفرات هوا از آن قطر بیشتر است را نشان می‌دهد که این اعداد از آنالیز تصاویر با استفاده از الگوریتم Clemex نرم افزار محاسبه می‌گردد.



شکل ۷- تصاویر نمونه‌های آماده شده بتن کفی به همراه نمودار توزیع اندازه حباب‌ها

### ۳-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی

درصد قرار داده شده‌اند، حفرات موئینه آن‌ها در حالت اشباع قرار داشته و با گذشت زمان به علت تکمیل فرایند هیدراسیون، مسدود می‌گردند. هر چند منافذ موئینه بتن معمولی بعلت بالا بودن نسبت آب به سیمان هیچگاه بطور کامل در طول زمان مسدود نمی‌گردند. حفرات هوای غیر اشباع و منفک نیز در داخل بتن مشابه سنگ‌دانه عمل نموده و هدایت الکتریکی بتن را کاهش می‌دهد. مسیر انتقال جریان الکتریکی از طریق حفرات موئینه صورت می‌گیرد، لذا با

شکل ۸ متوسط نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های مربوط به طرح مخلوط‌ها را در سنین مختلف تا سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد مقاومت الکتریکی بتن با افزایش سن نمونه، بعلت تکمیل فرایند هیدراسیون در طول زمان افزایش می‌یابد. از آنجاکه نمونه‌ها پس از بیرون آمدن از قالب تا سن آزمایش درون انکوباتور با رطوبت حداقل ۹۵



می‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری گردد. لذا با افزایش حجم کف در یک نسبت آب به سیمان ثابت، شاهد کاهش پارامترهای دوامی بعلاوه نفوذ بیشتر از طریق حفرات بزرگ و متصل به هم خواهیم بود.

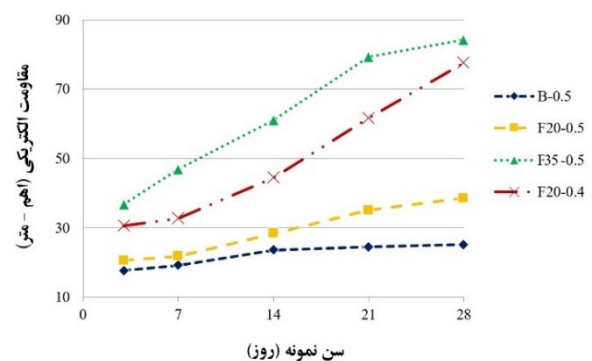
- حفرات هوای غیر اشباع و منفک نیز در داخل بتن مشابه سنگ‌دانه عمل نموده و هدایت الکتریکی بتن را کاهش می‌دهد. مسیر انتقال جریان الکتریکی از طریق حفرات موئینه صورت می‌گیرد. لذا با افزایش حجم کف، حجم خمیر سیمان و به تبع آن، حجم کل حفرات موئینه کاهش می‌یابد. همچنین کاهش نسبت آب به سیمان باعث کاهش قطر و حجم کلی حفرات موئینه می‌گردد و در نتیجه مقاومت الکتریکی بتن افزایش می‌یابد، لذا علاوه بر کاهش حجم حفرات موئینه، افزایش حفرات هوای غیر اشباع و منفک نیز منجر به افزایش مقاومت الکتریکی بتن کفی می‌گردد.

- بطور کلی با افزایش حجم کف در طرح مخلوط با نسبت آب به سیمان برابر، میانگین قطر حفرات هوا افزایش یافته و تعدادی ریز ترک در جدار حفرات ایجاد می‌شود و با ایجاد سوراخ در بعضی حفرات، موجب اتصال آن‌ها به یکدیگر و تشکیل حفرات بزرگتر شده که در نهایت، عوامل مذکور می‌تواند زمینه ساز نفوذ بیشتر یون‌های مهاجم به داخل بتن کفی گردد و دوام آن‌ها را به مخاطره بیندازد. لذا افزایش حجم کف تا جایی که منجر به ادغام حفرات و وجود ریز ترک و سوراخ درون حباب نگردد، می‌تواند عملکرد بهتری در زمینه دوام از خود نشان دهد.

## ۵- مراجع

- [1] R. C. Valore, "Cellular concretes Part 2 physical properties." pp. 817-836.
- [2] K. Ramamurthy, E. K. Nambiar, and G. I. S. Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete," *Cement and concrete composites*, vol. 31, no. 6, pp. 388-396, 2009.
- [3] Y. M. Amran, N. Farzadnia, and A. A. Ali, "Properties and applications of foamed concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990-1005, 2015.
- [4] A. Bagheri, and S. Samea, "Role of non-reactive powder in strength enhancement of foamed concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 203, pp. 134-145, 2019.
- [5] C. Bing, W. Zhen, and L. Ning, "Experimental

افزایش حجم کف، حجم خمیر سیمان و به تبع آن، حجم کل حفرات موئینه کاهش می‌یابد. همچنین کاهش نسبت آب به سیمان باعث کاهش قطر و حجم کلی حفرات موئینه می‌گردد و در نتیجه مقاومت الکتریکی بتن افزایش می‌یابد. لذا علاوه بر کاهش حجم حفرات موئینه، افزایش حفرات هوای غیر اشباع و منفک نیز منجر به افزایش مقاومت الکتریکی بتن کفی می‌گردد. لذا همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، کمترین میزان مقاومت الکتریکی در هر سن، مربوط به ملات پایه و بیشترین میزان نیز مربوط به بتن کفی با ۳۵ درصد حجم کف می‌باشد. از آنجائیکه با کاهش نسبت آب به سیمان حجم کلی و قطر حفرات موئینه کاهش می‌یابد، بتن کفی سازه ای (F20-0.4) بعلاوه پائین بودن نسبت آب به سیمان و حجم خمیر سیمان و همچنین افزایش مقدار سنگ‌دانه در مقایسه با بتن کفی با حجم کف برابر و نسبت آب به سیمان ۰/۵ (F20-0.5) در هر سن، دارای مقاومت الکتریکی بیشتری است که این نتیجه بوضوح تأثیر کاهش هدایت الکتریکی ناشی از افزایش میزان سنگ‌دانه و کاهش منافذ موئینه در طرح را نشان می‌دهد.



شکل ۸- متوسط نتایج مقاومت الکتریکی آزمون‌ها تا سن ۲۸ روز

## ۴- نتیجه گیری

در ادامه به تشریح مختصر یافته‌های این مطالعه پرداخته شده است:  
 - افزایش حجم کف به ملات پایه، منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت نمونه‌ها گردیده است، به طوری که با اضافه کردن ۲۰ و ۳۵ درصد حجم کف به ملات پایه، مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها به ترتیب به ۱۳/۱ و ۶/۰۴ مگاپاسکال تقلیل یافته است.  
 - با افزایش درصد کف، قطر حباب‌های هوا افزایش و فاصله بین آن‌ها کاهش یافته است. همچنین تعداد ریز ترک‌ها در دیواره حفرات و میزان حباب‌های ادغام شده با یکدیگر افزایش یافته که

تأثیر مواد افزودنی حبابزا بر روی نفوذپذیری و دوام بتن ساخته شده با سیمان پرتلند ۱-۵۲۵، تحقیقات بتن، سال شانزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۲، صفحات ۹۳-۱۰۴.

[19] A. A. Hilal, N. H. Thom, and A. R. Dawson, "Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 12, no. 12, pp. 535-544, 2014.

[20] E. Kearsley, and P. Wainwright, "Porosity and permeability of foamed concrete," *Cement and concrete research*, vol. 31, no. 5, pp. 805-812, 2001.

[21] E. K. Nambiar, and K. Ramamurthy, "Sorptions characteristics of foam concrete," *Cement and concrete research*, vol. 37, no. 9, pp. 1341-1347, 2007.

[22] L. Cox, and S. Van Dijk, "Foam concrete: a different kind of mix," *Concrete*, vol. 36, no. 2, 2002.

[23] W. She, Y. Zhang, C. Miao *et al.*, "Water transport in foam concrete: visualisation and numerical modelling," *Magazine of Concrete Research*, pp. 1-13, 2019.

[24] K. Brady, G. Watts, and M. R. Jones, *Specification for foamed concrete*: TRL Limited Crowthorne, UK, 2001.

[25] ASTM C150 "Standard specification for Portland cement," *Annual book of ASTM standards*, vol. 4, 2002.

[26] ASTM C796 "Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam," 2012.

[27] BS EN 12390 part 3 "Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens", British Standards Institution, London, UK, 2009.

[28] A. A. Hilal, N. H. Thom, and A. R. Dawson, "On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives," *Construction and Building Materials*, vol. 85, pp. 157-164, 2015.

[29] E. K. Nambiar, and K. Ramamurthy, "Air-void characterisation of foam concrete," *Cement and concrete research*, vol. 37, no. 2, pp. 221-230, 2007.

[30] T. Chandni, and K. Anand, "Utilization of recycled waste as filler in foam concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 154-160, 2018.

[31] L. Tang, "Guidelines for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress," *Report Number: GRD1-2002-71808*, 2005.

[32] E. Kunhanandan Nambiar, and K. Ramamurthy, "Fresh state characteristics of foam

research on properties of high-strength foamed concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 113-118, 2011.

[6] A. Bagheri, and S. Samea, "Parameters Influencing the Stability of Foamed Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 04018091, 2018.

[7] A. A. Hilal, N. H. Thom, and A. R. Dawson, "On entrained pore size distribution of foamed concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 227-233, 2015.

[8] M. Jones, and A. McCarthy, "Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material," *Magazine of concrete research*, vol. 57, no. 1, pp. 21-31, 2005.

[9] Y. Fu, X. Wang, L. Wang *et al.*, "Foam Concrete: A State of the Art and State of the Practice Review," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, 2020.

[10] A. Bagheri, and M. M. Rastegar, "Investigation of passive layer formation on steel rebars in foamed concrete," *Materials and Corrosion*, vol. 70, no. 7, pp. 1252-1261, 2019.

[11] A. Bagheri, and M. M. Rastegar, "Effects of foam content on chloride ingress and steel corrosion in foamed concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 73, no. 7, pp. 356-365, 2021.

[12] M. M. Rastegar, and A. Bagheri, "Effect of foam volume on penetration parameters of foamed concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 74, no. 19, pp. 989-998, 2022.

[13] H.-W. Song, and V. Saraswathy, "Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A," *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 2, no. 1, pp. 1-28, 2007.

[14] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener *et al.*, "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete," *Materials and Structures*, vol. 33, no. 10, pp. 603-611, 2000.

[15] R. Rodrigues, S. Gaboreau, J. Gance *et al.*, "Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring," *Construction and Building Materials*, vol. 269, pp. 121240, 2021.

[16] M. Maghrebi, M. Khanzadi, M. Habibian *et al.*, "Study the Influences of Nano-Silica on Electrical Resistivity of Cement Paste," *Modares Civil Engineering journal*, vol. 14, no. 1, pp. 99-108, 2014.

[۱۷] امیر شیبانی، محسن تدین، تأثیر مواد حبابزا بر جذب آب نیم

ساعته و مقاومت ویژه الکتریکی بتن، دومین کنفرانس ملی بتن

ایران، مهرماه ۱۳۸۹

[۱۸] اعظم کامل، مجتبی لزرگی نظرگاه، مرتضی طیبی‌نیا، بررسی

- concrete” *Journal of materials in civil engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 111-117, 2008.
- [33] K. Brady, G. Watts, and M. R. Jones, “Specification for foamed concrete,” *Specification for foamed concrete*, vol. 1, no. 1, pp. 1-65, 2001.
- [34] ASTM C869 “Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete,” *Annual book of ASTM standards*, 2016.

## Investigating the impact of foam volume on pore characteristics and electrical resistance of foamed concrete

Mohammad Mahdi Rastegar\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Ebrahim Ghiasvand

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

### Abstract

This research investigates the influence of air void volume resulting from foaming agents on the pore structure and electrical resistivity of foamed Concrete. The pore structure, including average foam bubble diameter, bubble size distribution, and spacing in concrete mixes with 0.5 water-cement ratios and 0, 20, and 35% foam volume, as well as structural foamed concrete with 0.4 water-cement ratios and 20% foam volume, is compared. Scanning electron microscope (SEM) images of foamed Concrete samples and image analysis using optical microscopy and software corroborate each other, indicating that with increased foaming, the mean air void diameter increases while the spacing decreases. Furthermore, the number of microcracks in bubble walls and coalesced bubbles increases, which may increase permeability. Discrete, unsaturated air voids also act as aggregates, decreasing concrete electrical conductivity. Since electricity transfer occurs through capillary pores, increased foam volume decreases cement paste and thus total capillary pore volume. Moreover, a lower water-cement ratio reduces capillary pore diameter and total volume, increasing concrete electrical resistivity. The results demonstrate that reducing the water-cement ratio and increasing foam volume without causing bubble coalescence, microcracks, and pore-wall perforations can provide superior durability performance.

**Keywords:** Foamed concrete, Foam volume, porosity, Electrical resistance, Image analysis.

---

\* Corresponding Author: m.rastegar@basu.ac.ir