

## مطالعه خواص مکانیکی، جذب آب و ریزساختار ملات سیمانی حاوی افزودنی‌های بازیافتی

قاسم پاچیده، مجید قلهکی\*

۱- پسادکتري عمران سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.  
۲- استاده، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱  
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸  
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

### کلمات کلیدی:

ملات سیمانی  
افزودنی‌های ضایعاتی  
خصوصیات مکانیکی  
جذب آب  
SEM

**خلاصه:** امروزه با توجه به بحث‌های زیست‌محیطی و تأثیرات سوء استفاده از سیمان بر طبیعت، استفاده از مواد بازیافتی در بتن یا ملات افزایش یافته است. در واقع می‌توان برخی از مواد بازیافتی را به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن یا ملات استفاده نمود. در این مقاله با جایگزینی چهار نوع ماده بازیافتی شامل پودرهای آهن، لاستیک، شیشه و پوسته تخم‌مرغ به ملات سیمانی با مقادیر ۱۴، ۲۱ و ۲۸٪، خصوصیتی از قبیل مقاومت فشاری و کششی، جذب آب و خواص ریزساختار آن مطابق استاندارد بررسی گردید. آزمایش‌های مقاومتی و ریزساختار نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری و آزمایش جذب آب در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام شدند. نتایج نشان دادند که استفاده از تمامی مواد افزودنی بکار برده شده تا ۱۴٪ مقاومت فشاری را حداکثر تا ۱۴٪ افزایش می‌دهند. تا میزان استفاده از ۲۸٪ مواد افزودنی، مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده که استفاده از ۷٪ مواد افزودنی مقاومت کششی بیشتری در بر خواهد داشت. همچنین میزان جذب آب نمونه‌های حاوی پودر شیشه و پوسته تخم‌مرغ تا حدود ۳۵٪ کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد که این مسأله به خوبی در آزمایش SEM قابل مشاهده می‌باشد.

### ۱- مقدمه

از پودر پوسته تخم‌مرغ استفاده شد. با اندازه تخم‌مرغ متوسط وزن پوسته آن ۸ الی ۹ گرم بوده که سالیانه حدود ۸/۴ هزارتن پوسته تخم‌مرغ دور ریخته می‌شود که می‌تواند برای استفاده کارخانجات صنعتی مفید باشد. امروزه با افزایش توسعه صنعت، نیاز به تولید انرژی نیز به سرعت در حال افزایش است. با توجه به توسعه سریع صنعت در جهان، مشکلات زیست‌محیطی بیشتر و بیشتر شده است که امری اجتناب ناپذیر است. بطور گسترده‌ای شناخته شده است که پوسته تخم‌مرغ از مواد زائد کارخانجات صنعتی و کارگاه‌های شیرینی‌پزی قابل جمع‌آوری است. از آنجا که پوسته‌های تخم‌مرغ برای دفع نیاز به مدیریت خاص دارند، استفاده صنعتی آنها از اهمیت زیادی برخوردار است [۱۰] گوسیکا و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن پودر پوسته تخم‌مرغ به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن پرداختند. درصد‌های جایگزینی

بسیاری از کشورها در مورد نحوه استفاده دوباره از مواد زائد برای جلوگیری از آسیب به محیط زیست کار می‌کنند [۵-۱] در آخرین مطالعات پیشین، نویسنده گزارش داد که کشورهای توسعه‌یافته اقدامات جدی در جهت محافظت از محیط زیست در برابر مواد بازیافتی دارند، درحالی‌که بسیاری از کشورهای در حال توسعه آنها را از دست می‌دهند. مطالعات مختلف ادعا می‌کنند که مواد بازیافتی می‌توانند برای تولید محصولات جدید و به عنوان افزودنی‌ها برای استفاده مؤثر از منابع طبیعی و جلوگیری از مشکلات محیطی استفاده شوند [۶] استفاده از مواد زائد در تولید بتن نیز در برخی مطالعات دیگر مورد توجه قرار گرفته است ۸۷ در یک مطالعه اخیر [۹] برای بهبود مقاومت و نفوذپذیری بتن

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mgholhaki@semnan.ac.ir



پودر پوسته تخم‌مرغ بجای سیمان عبارتند از ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪. مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روزه عمل آوری تعیین شد. طبق نتایج، با جایگزینی ۵٪ پودر پوسته تخم‌مرغ بجای سیمان موجود در بتن، کاهش شدیدی در مقاومت فشاری رخ داد [۱۱] بینسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی خصوصیات مکانیکی و رادیواکتیوی ملات‌های سیمانی حاوی سیمان، ماسه و پودر پوسته تخم‌مرغ پرداختند. در واقع هدف اصلی تحقیقات آنها، امکان‌سنجی استفاده از پودر پوسته تخم‌مرغ در ملات به عنوان محافظت ساختمان‌ها در برابر اشعه تابش خورشید می‌باشد. همچنین به منظور بررسی کنترل کیفیت آن، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که وجود پودر پوسته تخم‌مرغ در ملات سبب کاهش مقاومت فشاری و خمشی شده، اما مقاومت ملات در برابر اشعه رادیواکتیو افزایش یافت [۱۲]. تیونگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ با افزودن پودر پوسته تخم‌مرغ با مقادیر ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ به عنوان جایگزین مواد سیمانی در فوم بتن سبک به این نتیجه دست یافتند که افزودن پودر پوسته تخم‌مرغ سبب کاهش دوام و تغییرات حجمی در مرحله گیرش نهایی نمونه شده و مقاومت فشاری و خمشی را تا مقدار جایگزینی ۵٪ افزایش می‌دهد [۱۳]. بالتو و همکاران در سال ۲۰۱۹ به این نتیجه رسیدند که افزودن پودر پوسته تخم‌مرغ و خاکستر بادی به کامپوزیت سیمانی سبب کاهش هدایت حرارتی آن شده بدون اینکه از کارایی، مقاومت و جذب آب آن کاسته شود. همچنین می‌توان از این ترکیب، جهت کارهای گچ‌کاری ساختمان استفاده نمود که سبب صرفه‌جویی در انرژی به کمک استفاده از مواد زائد خواهد شد [۱۴].

مافالما ماتوس و سوساکوتینهو در سال ۲۰۱۲ به بررسی دوام ملات سیمانی حاوی پودر شیشه پرداختند. بدین منظور پودر شیشه با مقادیر ۱۰ و ۲۰٪ به عنوان جایگزین سیمان، به ملات افزوده شد. نتیجه آزمایش آنها نشان داد که پودر شیشه سبب بهبود دوام ملات سیمانی می‌شود [۱۵]. در تحقیق دیگری محققان با جایگزینی ۰ تا ۲۰٪ پودر شیشه بجای سیمان به این نتیجه دست یافتند که افزودن جایگزینی ۲۰٪ پودر شیشه سبب شاخص‌های زیست‌محیطی پایدارتری نسبت به حالتی که از پودر شیشه استفاده نشده باشد، شده است [۱۶]. از تحقیقات قبلی انجام شده، این واقعیت ثابت شده است که ذرات شیشه با اندازه کمتر از ۷۵ میکرومتر در مقادیر جایگزینی

۱۰ تا ۲۵٪ سیمان پرتلند معمولی، نتایج مطلوبی در تولید ملات و بتن ایجاد می‌کنند. در تحقیقات ارائه شده توسط علی‌ابدو و همکاران [۱۷] به این نتیجه رسیدند که جایگزینی یا افزودن پودر شیشه با اندازه ذرات ۷۵ میکرومتر به مخلوط ملات یا بتن، نتایج مناسبی در بر خواهد داشت. علاوه بر این، چن و همکاران [۱۸] به این نتیجه دست یافتند که ذرات شیشه با اندازه ذرات ۳۸ تا ۳۰۰ میکرومتر را می‌توان ۴۰ تا ۵۰٪ به عنوان جایگزین سیمان استفاده نمود. طبق تحقیقات شاو و همکاران [۱۹] استفاده از ذرات شیشه ۳۸ تا ۱۵۰ میکرومتر، بر روی واکنش پوزولانی در جایگزینی سیمان تأثیرگذار می‌باشد. لیو و همکاران [۲۰] گزارش دادند که استفاده از پودر شیشه در ملات سبب کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد شده، اما سرعت فرآیند هیدراتاسیون و سرعت ایجاد ژل CASAH را افزایش می‌دهد. ونگ و همکاران [۲۱] گزارش دادند که استفاده از ۱۰٪ جایگزینی پودر پوسته تخم‌مرغ بجای سیمان پرتلند معمولی سبب افزایش دوام ملات در سن ۲۸ روزه می‌شود. سای و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر افزودن پودر نانوسیلیس و پودر شیشه بر واکنش سیلیکا-قلیایی ملات‌های سیمانی پرداختند. نتایج نشان دادند که افزودن ۲٪ نانوسیلیس یا ۱۰٪ پودر شیشه و یا ترکیب این دو، سبب کاهش واکنش سیلیکا-قلیایی می‌شود [۲۲].

ایلماز و دگیرمنسی در سال ۲۰۰۹ به بررسی قابلیت استفاده از پودر لاستیک و خاکستر بادی با سیمان پرتلند در ملات سیمانی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزودن پودر لاستیک به ملات سیمانی، مقاومت فشاری و درصد جذب آب کاهش یافته، اما با افزودن خاکستر بادی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد [۲۳]. هریانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به مطالعه و بررسی دوام بتن خودتراکم حاوی پودر لاستیک بازیافتی به مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰٪ پرداختند. نتایج نشان دادند که مقاومت فشاری بتن خودتراکم با جایگزینی ۵٪ پودر لاستیک به جای سیمان بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین با جایگزینی پودر لاستیک، پدیده خزش در بتن تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد [۲۴]. چنی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به مطالعه و بررسی خصوصیات دوام ملات‌های سیمانی حاوی پودر لاستیک بازیافتی با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵٪ به عنوان جایگزین سیمان پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از پودر لاستیک بازیافتی در ملات‌های سیمانی سبب کاهش حرارت هیدراتاسیون و افزایش مقاومت در

سیمان شاهرود و ماسه مصرفی نیز از نوع طبیعی دوبار شور تیزگوشه با ضریب نرمی ۲/۷۶، وزن مخصوص ۲/۷ و جذب آب ۲/۸٪ می‌باشد. آب مصرفی در ساخت ملات، آب شرب شهر تهران بوده و روان‌کننده مصرفی نیز از نوع ابر روان‌کننده کربوکسیلاتی رده C20 تولیدی کارخانه بتن شیمی خاتم می‌باشد. افزودنی‌های استفاده شده از مواد بازیافتی و زائد کارخانجات تهیه شدند. جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت ملات‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

بر روی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت ملات، آزمایش دانه‌بندی در آزمایشگاه مکانیک خاک معدن شن و ماسه تیغاب ورامین انجام شد. بر طبق این پژوهش، به ذرات کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر ماسه اطلاق می‌شود. با توجه به اینکه در ملات‌های سیمانی صرفاً می‌توان از ماسه استفاده نمود، بنابراین تنها مصالح سنگی بکار رفته در اختلاط ملات، ماسه بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سنگدانه‌ها از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده و محدوده وسیعی از اندازه‌ها را در بر گرفته است.

#### ۲-۲- طرح اختلاط ملات مصرفی

مطابق جدول ۲ که جزئیات طرح‌های اختلاط نمونه‌های ملات ساخته شده را نشان می‌دهد، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شد. از آنجایی که کاربرد استفاده از مواد افزودنی به عنوان جایگزین سیمان مصرفی می‌باشد، افزودنی‌های بازیافتی با اندازه‌های ۵۰ الی ۶۰ میکرومتر و با مقادیر ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸٪ جایگزین سیمان در ملات شدند. با توجه به خاصیت گیرش و جذب آب متفاوت سیمان و افزودنی‌های مصرفی، به مقادیر مورد نیاز تا حدی که به روانی

برابر خوردگی تا حدود ۲۰٪ می‌شود [۲۵] بنابراین با مطالعه و بررسی تحقیقات اخیر در زمینه استفاده از مواد افزودنی بازیافتی در ملات‌های سیمانی، علی‌رغم وجود تحقیقاتی بصورت پراکنده در زمینه‌های مختلف، اما تاکنون عملکرد چند نوع ماده افزودنی بازیافتی با یکدیگر بصورت یکجا مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفته است. در این مقاله با جایگزینی پودرهای شیشه، آهن، لاستیک و پوسته تخم‌مرغ با مقادیر ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸٪ به عنوان جایگزین بخشی از سیمان موجود در ملات سیمانی به بررسی تغییرات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، درصد جذب آب و خواص ریزساختار آن به کمک آزمایش SEM پرداخته شد. در نهایت با رگرسیون نتایج حاصله، روابطی خطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی پیشنهاد شدند.

#### ۲- برنامه آزمایشگاهی

برای انجام این مطالعه نمونه‌های مکعبی استاندارد به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر جهت انجام تست مقاومت فشاری و جذب آب، نمونه‌های پاپیونی (بریکت) استاندارد برای انجام تست مقاومت کششی در مقادیر ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸٪ پودر آهن، پودر شیشه، پودر لاستیک و پودر پوسته تخم‌مرغ (با اندازه ذرات ۵۰ الی ۶۰ میکرومتر برای تمامی افزودنی‌های استفاده شده) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ملات سیمانی ساخته شدند. همچنین آزمایش جذب آب مطابق استاندارد در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام شد.

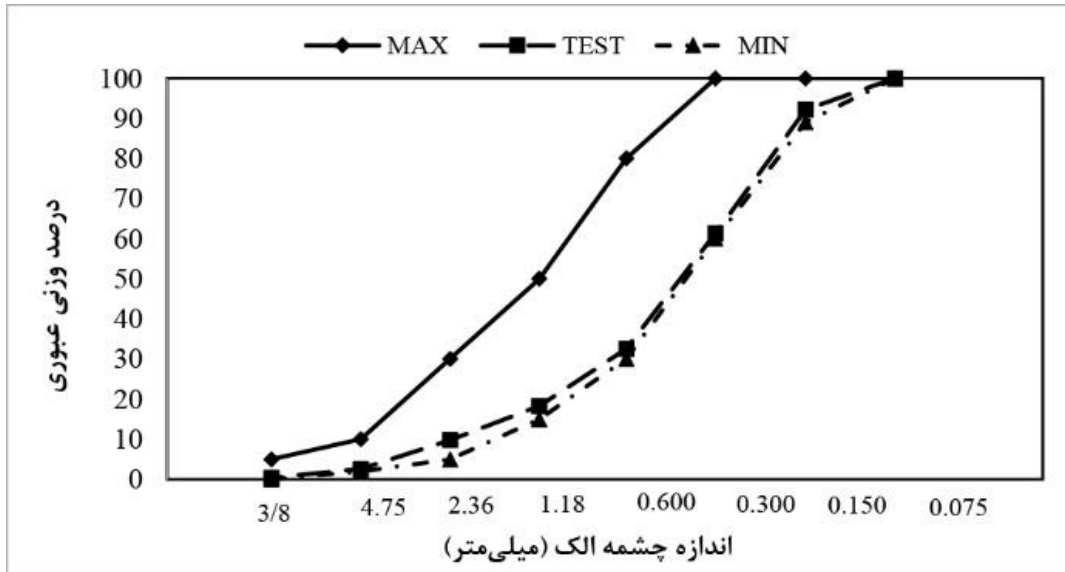
#### ۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

سیمان استفاده شده در اختلاط ملات، از نوع تیپ ۲ (پرکاربردترین و مناسب‌ترین نوع سیمان در شرایط محیطی معمولی) تولیدی کارخانه

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی در ملات

Table 1. Properties of the Materials used in the Concrete Mixes

سیمان	تیپ ۲ شاهرود
ماسه	طبیعی دوبار شور
آب	آب شرب تهران
روان‌کننده	ابر روان‌کننده کربوکسیلاتی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه

Fig. 1. Sand Particle Size Distribution Curve

جدول ۲. خلاصه طرح‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)

Table 2. Summary of the Mix Designs (kg/m<sup>3</sup>)

روان‌کننده	درصد افزودنی					آب	سیمان	ماسه (درصد رطوبت = ۲/۱)	طرح
	۲۸	۲۱	۱۴	۷	۰				
۰	-	-	-	-	۰	۳۰۸	۷۷۰	۱۲۸۷	A
۷	-	-	-	۵۴	-	۳۰۸	۷۱۶	۱۲۸۷	EP-7%
۱۱	-	-	۱۰۸	-	-	۳۰۸	۶۶۲	۱۲۸۷	EP-14%
۱۴	-	۱۶۱/۵	-	-	-	۳۰۸	۶۰۸/۵	۱۲۸۷	EP-21%
۱۸	۲۱۵/۵	-	-	-	-	۳۰۸	۵۵۴/۵	۱۲۸۷	EP-28%
۵	-	-	-	۵۴	-	۳۰۸	۷۱۶	۱۲۸۷	GP-7%
۶/۵	-	-	۱۰۸	-	-	۳۰۸	۶۶۲	۱۲۸۷	GP-14%
۸	-	۱۶۱/۵	-	-	-	۳۰۸	۶۰۸/۵	۱۲۸۷	GP-21%
۱۰	۲۱۵/۵	-	-	-	-	۳۰۸	۵۵۴/۵	۱۲۸۷	GP-28%
۰	-	-	-	۵۴	-	۳۰۸	۷۱۶	۱۲۸۷	IP-7%
۰	-	-	۱۰۸	-	-	۳۰۸	۶۶۲	۱۲۸۷	IP-14%
۴/۵	-	۱۶۱/۵	-	-	-	۳۰۸	۶۰۸/۵	۱۲۸۷	IP-21%
۵	۲۱۵/۵	-	-	-	-	۳۰۸	۵۵۴/۵	۱۲۸۷	IP-28%
۱۲	-	-	-	۵۴	-	۳۰۸	۷۱۶	۱۲۸۷	RP-7%
۱۷	-	-	۱۰۸	-	-	۳۰۸	۶۶۲	۱۲۸۷	RP-14%
۲۳	-	۱۶۱/۵	-	-	-	۳۰۸	۶۰۸/۵	۱۲۸۷	RP-21%
۲۹	۲۱۵/۵	-	-	-	-	۳۰۸	۵۵۴/۵	۱۲۸۷	RP-28%

انجام شد. ابتدا به میزان مورد نظر (طبق طرح اختلاط) مخلوط ملات به همراه افزودنی و ابر روان کننده ساخته، سپس فرآیند نمونه‌گیری در نمونه‌های مکعبی استاندارد به ابعاد  $5 \times 5 \times 5$  سانتی‌متر جهت انجام تست مقاومت فشاری و جذب آب، نمونه‌های پایبونی (بریکت) استاندارد جهت تست مقاومت کششی انجام شد. هر قالب، در سه مرحله ملات ریخته شده و در هر بار ویبره گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها داخل حوضچه آب در دمای حدود  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد قرار داده و نمونه‌ها پس از پایان مدت عمل‌آوری، از داخل حوضچه آب خارج شدند.

پس از اتمام فرآیند عمل‌آوری نمونه‌ها، پس از اینکه آب سطحی نمونه‌ها گرفته شد، در زیر جک تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه برای انجام آزمایش مقاومت فشاری برابر  $0.5$  مگاپاسکال بر ثانیه طبق استاندارد EN-12390-13 [۲۷] انتخاب گردید. در شکل ۲ تصاویر برخی از نمونه‌ها پس از اتمام فرآیند عمل‌آوری ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌های حاوی پودر لاستیک بعلت عدم

مطلوب برسد (۱ تا ۵٪ وزنی سیمان)، از ابر روان‌ساز کربوکسیلاتی تولید شرکت بتن شیمی خاتم در ساخت نمونه‌های ملات استفاده شد. همچنین مدول نرمی پودرهای آهن، لاستیک، شیشه و پوسته تخم‌مرغ به ترتیب عبارتند از  $1/8$ ،  $5/42$ ،  $3/15$  و  $2/94$ .

همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، نمونه شاهد (نمونه‌ای که هیچ‌گونه افزودنی در آن بکار نرفته باشد) با حرف A و نمونه‌های حاوی پودر پوسته تخم‌مرغ، شیشه، آهن و لاستیک به ترتیب با حرف EP (Egg Powder)، GP (Glass Powder)، IP (Iron Powder) و RP (Rubber Powder) نشان داده شده‌اند. همچنین اعداد نوشته شده در کنار حرف‌ها (7% - 14% - 21% - 28%)، نمایانگر درصد جایگزینی آنها با سیمان در اختلاط ملات می‌باشند.

### ۳-۲- روش آزمایش

نحوه ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C192 [۲۶] پس از ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز قرارگیری در حوضچه آب



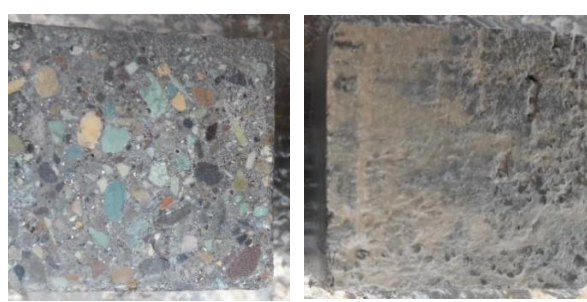
GP (ب)



EP (الف)



RP (ت)



IP (پ)

شکل ۲. تصاویر نمونه‌ها پس از پایان عمل‌آوری  
Fig. 2. Specimens at the end of the Curing Process



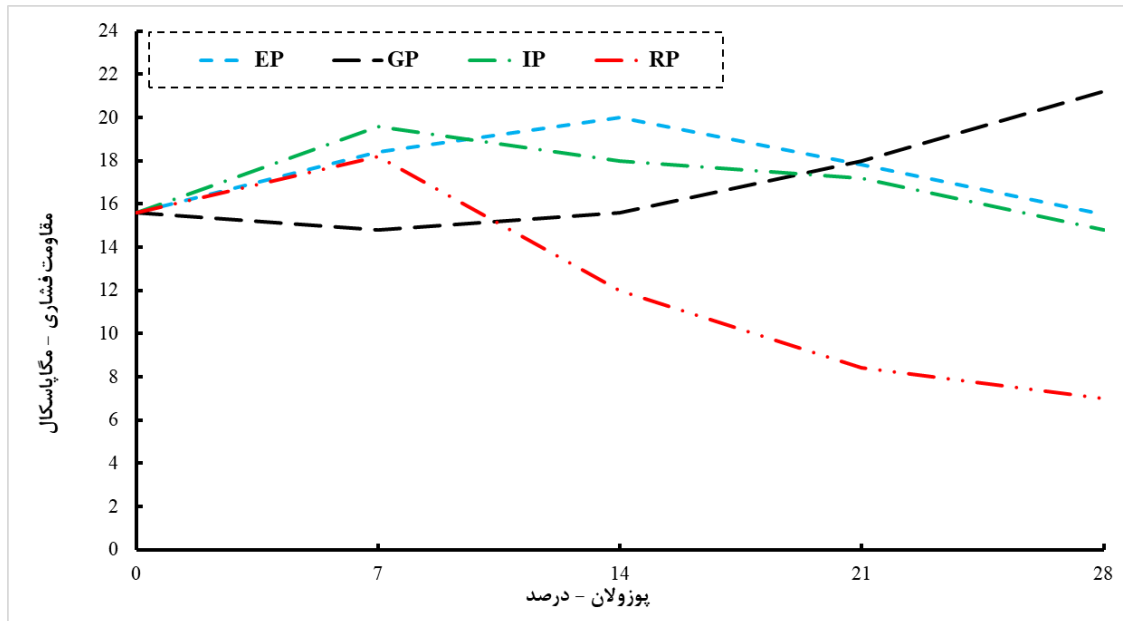


ب) نحوه شکست نمونه‌ها



الف) نمونه حاوی پودر لاستیک

شکل ۳. تصاویر نمونه‌ها پس از پایان آزمایش مقاومت فشاری  
Fig. 3. Specimens at the end of the Compressive Strength Test



شکل ۴. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها  
Fig. 4. Compressive Strength Diagram

شیشه به علت خاصیت بلوری آن، کاملاً صیقلی می‌باشد.

### ۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از انجام مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمایشات مقاومت فشاری و کششی در سن ۲۸ روزه و آزمایش جذب آب در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین به

چسبندگی مناسب با خمیر سیمان، دارای تخلخل بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. همچنین در نمونه‌های حاوی پودر آهن، ذرات آهن بر روی سطح نمونه قابل مشاهده بوده و زنگاره قهوه‌ای رنگ که ناشی از اکسیدشدن آهن می‌باشد، روی سطح نمونه را پوشانده است. در نمونه‌های حاوی پودر پوسته تخم‌مرغ نیز ذرات سفیدرنگ روی سطح نمونه قابل مشاهده بوده و سطح روی نمونه‌های حاوی پودر

افزایش درصد جایگزینی افزودنی استفاده شده بجای سیمان آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۴ ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری نمونه شاهد (A) برابر ۱۵/۶ مگاپاسکال بوده که به عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد افزودنی‌هایی که جایگزین سیمان شده‌اند، بررسی می‌شود. در مقدار جایگزینی ۷٪، افزودن EP، IP و RP سبب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۸، ۲۶ و ۱۷٪ شده است. اما افزودن ۷٪ GP مقاومت فشاری ملات را در حدود ۵٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش داده است که این مسأله می‌تواند مربوط به این موضوع باشد که در این مقدار، فعالیت سیلیس موجود در شیشه نتوانسته است جایگزین کلسیم‌کربنات موجود در سیمان شود. اما با افزایش مقدار استفاده از GP در ملات، مقاومت فشاری تا حدود ۱۵ و ۳۶٪ افزایش یافته است که در مقایسه با سایر نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که روند افزایشی داشته است. اما بطور کلی در مابقی نمونه‌ها، با افزایش میزان استفاده از افزودنی، از مقدار مقاومت فشاری کاسته شده است. با این وجود تقریباً بجز نمونه‌های حاوی RP، در مابقی نمونه‌ها (EP و IP) مقاومت فشاری همچنان بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. اصولاً با توجه به اینکه مواد

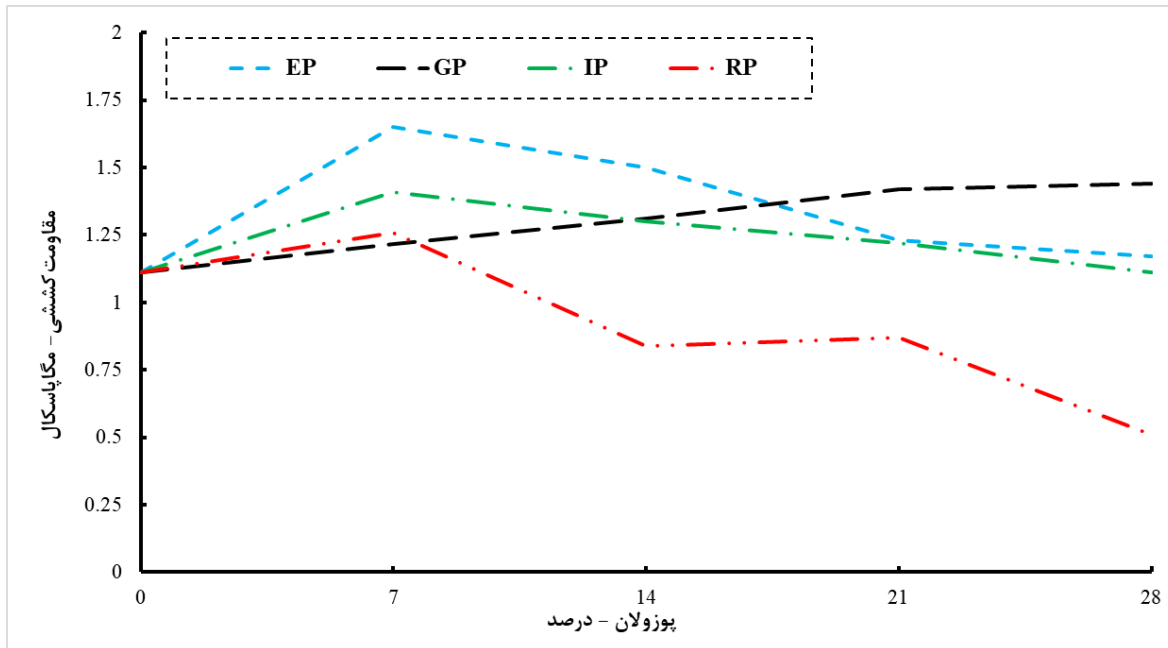
منظور بررسی عملکرد ریزساختار استفاده از مواد افزودنی در ملات، آزمایش SEM بر روی نمونه‌ها انجام شد.

### ۱-۳- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C109 [۲۸] انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. در شکل ۳ تصاویر برخی از نمونه‌ها پس از پایان آزمایش مقاومت فشاری آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ذرات نمونه حاوی پودر لاستیک پس از پایان تست بصورت کاملاً منفک مشاهده می‌شود که می‌تواند به علت عدم چسبندگی مناسب ذرات لاستیک و خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد. همچنین طبق شکل ۳، شکست کلیه نمونه‌ها به صورت شکست از وسط سنگدانه‌ها و با زاویه ۴۵ درجه قطری رخ داده است که نشان از این مطلب دارد که هنگام شکست، به ظرفیت نهایی خود رسیده‌اند. در شکل ۴ روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها بر حسب میزان



شکل ۵. نحوه انجام آزمایش مقاومت کششی  
Fig. 5. Procedure of the Tensile Strength Testing



شکل ۶. نمودار مقاومت کششی نمونه‌ها  
Fig. 6. Tensile Strength Diagram

مقاومت فشاری مناسب و با بکار بردن افزودنی‌های باز یافتی، مسأله اقتصادی و زیست‌محیطی را نیز تا حدودی مرتفع ساخت. طبق نتایج، استفاده از EP، GP و IP که از دورریز مواد موجود در صنایع مختلف بدست آمده است، کاملاً مقرون به صرفه بوده و آثار تخریبی کمتری برای محیط زیست در بر خواهد داشت، چراکه مقاومت فشاری آنها تقریباً برابر یا بیشتر از نمونه شاهد حاصل شده است.

با نگاهی دیگر به نتایج شکل ۴ می‌توان دریافت که تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها بجز نمونه‌های حاوی RP، عدد مناسبی است. در نمونه‌های حاوی EP، تا مقدار جایگزینی ۱۴٪ مقاومت فشاری افزایش یافته و سپس به تدریج کاسته شده است و از روند تغییرات می‌توان حدس زد که استفاده بیش از ۲۸٪ EP بجای سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها از مقدار مقاومت فشاری نمونه شاهد کمتر خواهد شد. اما در خصوص نمونه‌های حاوی GP مقاومت فشاری نمونه‌ها همواره رو به افزایش بوده؛ بطوری که در مقدار جایگزینی ۲۱ و ۲۸٪ مقاومت فشاری از نمونه شاهد نیز بیشتر شده است. اما نمی‌توان بطور قطع اظهار نظر نمود که برای مقادیر استفاده

پلاستیکی توانایی چسبندگی و گیرش مناسب با خمیر سیمان ندارند، لذا استفاده از RP در مقادیر جایگزینی ۱۴، ۲۱ و ۲۸٪ به علت اینکه حجم زیادی از فضای نمونه را در بر خواهد گرفت، باعث کاهش چسبندگی شده و مقاومت فشاری دچار کاهش شدیدی نسبت به نمونه شاهد (حدود ۵۵٪) و نسبت به نمونه حاوی ۷٪ RP (حدود ۶۲٪) شده است.

همچنین بطور کلی در خصوص مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی افزودنی‌های باز یافتی بکار رفته شده، می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده مواد افزودنی تا میزان ۱۴٪ جایگزینی عملکرد مطلوبی خواهد داشت. البته اندازه ذرات پودرهای باز یافتی بکار برده شده نیز می‌تواند در مقادیر مقاومت‌ها مؤثر باشد، که برای تحقیقات آتی قابل ارزیابی خواهد بود.

در نگاهی دیگر، از بعد مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی نیز می‌توان نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. از آنجایی که تولید و استفاده از سیمان در ملات یا بتن، سبب آلاینده‌گی و تخریب محیط زیست شده و متحمل هزینه‌های زیادی خواهد بود، لذا می‌توان با رسیدن به



برابر ۱/۱۱ مگاپاسکال می‌باشد که از تمامی نمونه‌های حاوی ۷٪ افزودنی مقاومت کششی کمتری دارد، بطوری که این مقدار مقاومت در نمونه‌های حاوی EP، GP، IP و RP به ترتیب برابر ۱/۶۵، ۱/۲۲، ۱/۴۱ و ۱/۲۶ می‌باشد. بنابراین به دلیل وجود ترکیبات کلسیم کربنات بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی EP بوده که برخی از مواد تشکیل دهنده آن مشابه سیمان می‌باشد. در نمونه‌های حاوی RP روند کاهشی شدیدی در مقاومت کششی رخ داده است که مربوط به عدم چسبندگی مواد پلاستیکی با خمیر سیمان می‌باشد. در سایر نمونه‌ها و در درصد‌های مختلف، مقاومت کششی از نمونه شاهد بیشتر بوده؛ با ذکر این مسأله که در نمونه‌های EP و IP به تدریج از این مقاومت کاسته شده که در مقدار ۲۸٪ جایگزینی، مقاومت کششی نزدیک به نمونه شاهد خواهد داشت و همچنین در نمونه‌های GP مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز پیوسته رو به افزایش می‌باشد تا در مقدار جایگزینی ۲۸٪ به عدد ۱/۴۴ مگاپاسکال رسیده است.

بنابراین بطور کلی بجز نمونه‌های RP که فقط تا مقدار جایگزینی ۷٪ توصیه می‌شود، در مابقی نمونه‌ها می‌توان تا مقدار ۲۸٪ جایگزینی انتظار مقاومت کششی مطلوبی را داشت. به این نکته نیز توجه شود که اندازه ذرات پودرهای بازیافتی مورد استفاده و طرح اختلاط موردنظر نیز می‌تواند تأثیر زیادی بر روی نتایج بگذارد.

بیش از ۲۸٪ پودر شیشه روند تغییرات کاهشی یا افزایشی است. در نمونه‌های حاوی IP و RP با افزایش مقدار استفاده از افزودنی، همواره مقاومت فشاری کاهش یافته؛ با این تفاوت که در نمونه‌های حاوی IP پس از ۲۸٪ جایگزینی و در نمونه‌های حاوی RP پس از ۱۴٪ جایگزینی، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد نیز کمتر شده است.

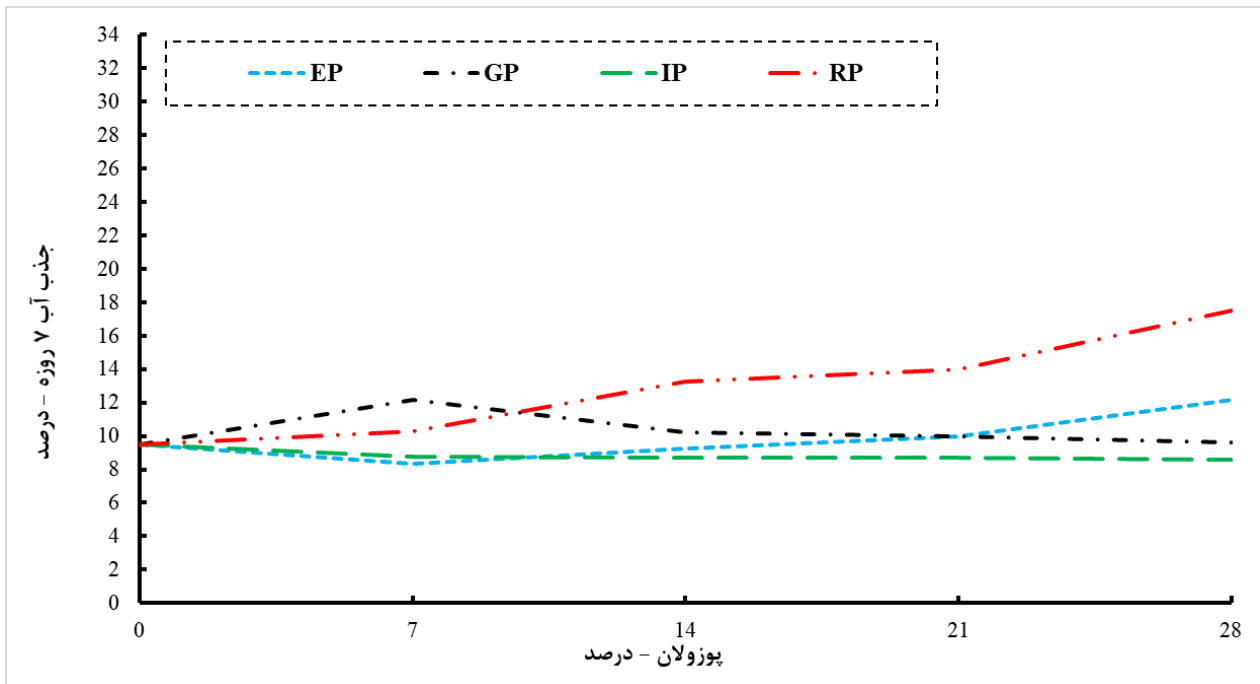
### ۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش مستقیم نمونه طبق استاندارد ASTM C190 [۲۹] استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه بصورت قائم بین دو فک دستگاه قرار گرفته؛ بطوری که دقیقاً در مرکز اعمال بار توسط جک ثابت می‌شود. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیروی قائم کششی بصورت اتوماتیک، تا مرحله شکست نمونه بار را وارد می‌کند. جک هیدرولیک دارای ظرفیت ۱۵۰ دکانیوتن بوده و با سرعت یک دکانیوتن بر ثانیه بار را اعمال می‌کند. در شکل ۵ تصویر نحوه انجام آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های ملات آورده شده است.

در شکل ۶ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقاومت کششی نمونه شاهد

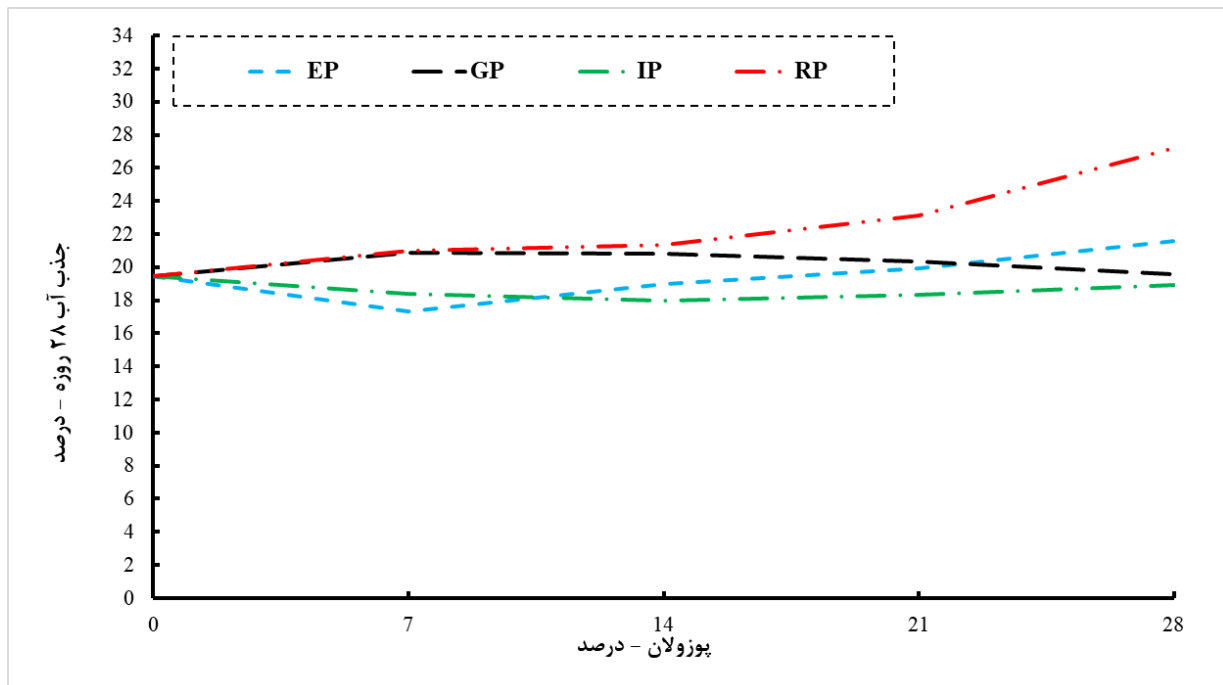


شکل ۷. تصاویر نمونه‌ها درون گرمکن الکتریکی  
Fig. 7. Images of the Specimens inside the Oven



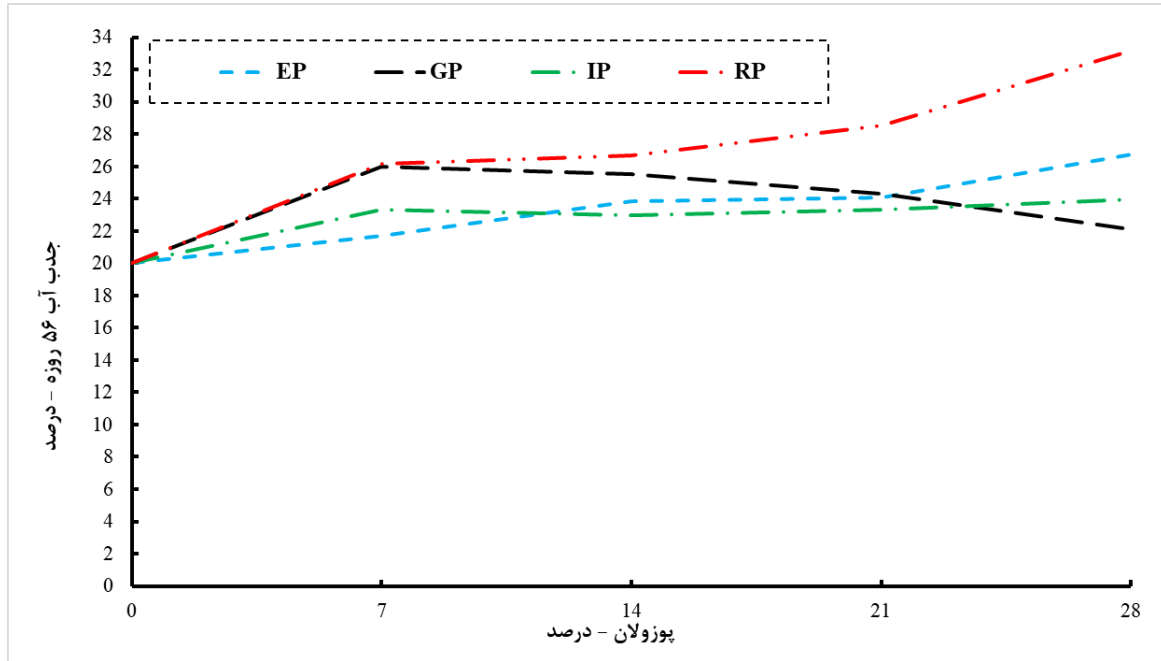
شکل ۸. درصد جذب آب نمونه‌ها بر حسب نوع افزودنی در سن ۷ روزه

Fig. 8. Water Absorption versus the type of Pozzolan Material at the age of 7 days (%)

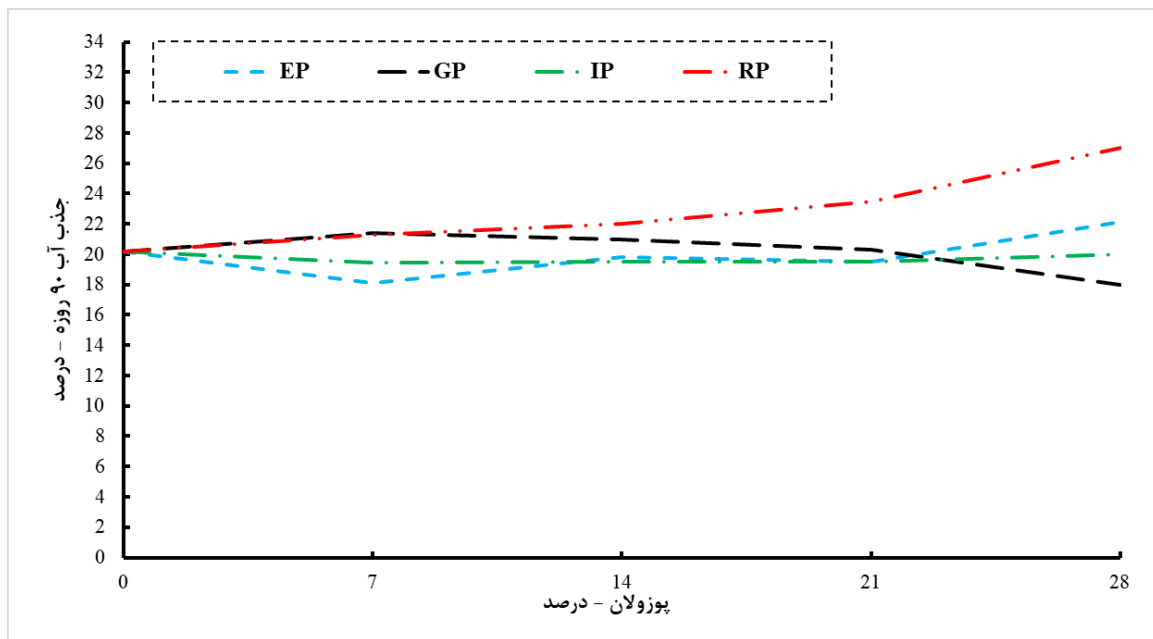


شکل ۹. درصد جذب آب نمونه‌ها بر حسب نوع افزودنی در سن ۲۸ روزه

Fig. 9. Water Absorption versus the type of Pozzolan Material at the age of 28 days (%)



شکل ۱۰. درصد جذب آب نمونه‌ها بر حسب نوع افزودنی در سن ۵۶ روزه  
 Fig. 10. Water Absorption versus the type of Pozzolan Material at the age of 56 days (%)



شکل ۱۱. درصد جذب آب نمونه‌ها بر حسب نوع افزودنی در سن ۹۰ روزه  
 Fig. 11. Water Absorption versus the type of Pozzolan Material at the age of 90 days (%)

کششی مثبت بوده بطوری که از ۱۳ تا ۲۵٪ متغیر است. در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های RP مقدار مقاومت کششی بیشتر از نمونه شاهد بوده، بگونه‌ای که در نمونه‌های EP و IP با افزایش مقدار استفاده از افزودنی، از مقدار مقاومت کششی کاسته شده و بطوری که در مقدار ۲۸٪ جایگزینی درصد افزایش مقاومت کششی به ترتیب برابر +۵ و ۰٪ می‌باشد. این بدین معنی است که احتمال دارد با افزایش بیش از این مقدار (۲۸٪) مقاومت کششی نمونه‌ها از مقدار نمونه شاهد کمتر شود. لذا مقدار استفاده بیش از ۲۸٪ به هیچ عنوان توصیه نمی‌شود. اما در نمونه‌های GP به دلیل داشتن مواد سیلیسی و خاصیت چسبندگی مناسب سیلیس با افزایش مقدار استفاده، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است.

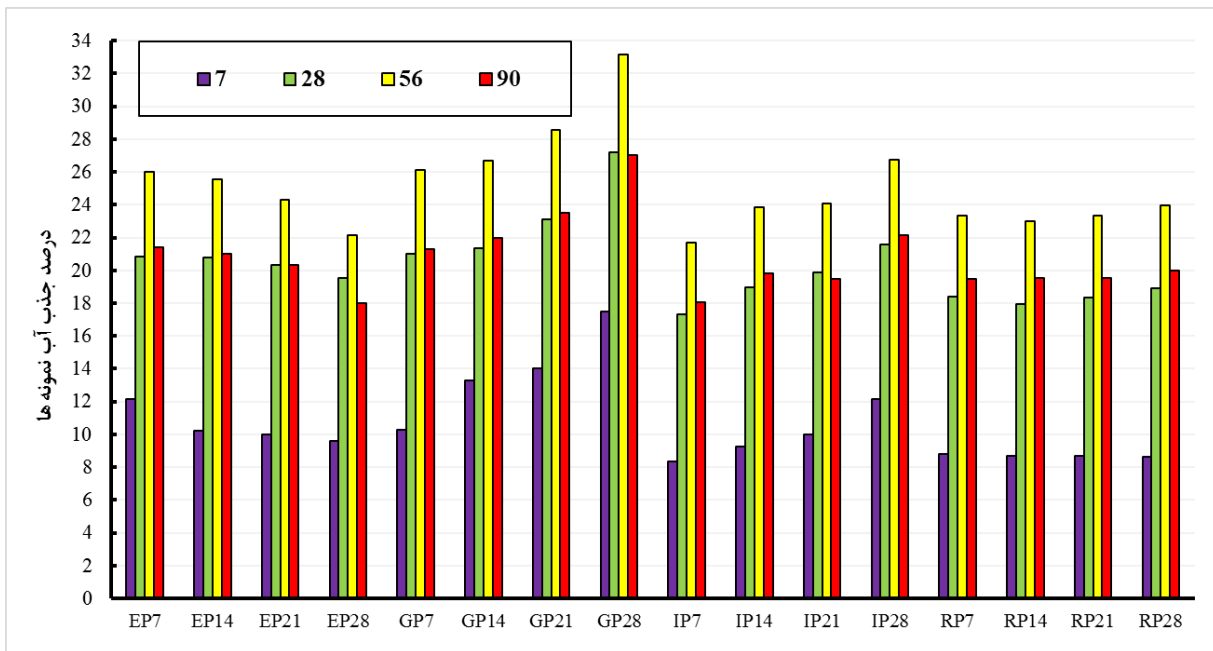
با جمع بندی مطالب فوق، می‌توان به این نکته اشاره نمود که هر چه افزودنی استفاده شده دارای ترکیباتی شبیه به سیمان (سیلیس - کلسیم کربنات و...) باشد، عملکرد بهتری در بهبود مقاومت کششی و یا فشاری خواهد داشت.

### ۳-۳- آزمایش جذب آب

لذا جهت حفظ حاشیه اطمینان و سیر نزولی تغییرات مقاومت کششی در برخی نمونه‌ها، توصیه می‌شود بطور کلی استفاده از این چهار نوع افزودنی که در این مقاله بکار برده شدند، نهایتاً به مقدار ۱۴٪ جایگزینی محدود شود.

با وجود اینکه عمدتاً مقاومت فشاری معیار ارزیابی ترکیبات سیمانی اعم از ملات، بتن و... می‌باشد، اما ضروری است که در قسمت مقاومت کششی نیز به مسأله اقتصادی و زیست‌محیطی توجه نمود. در نتیجه با برآیندگیری نتایج حاصله و بهبود اقتصاد و شرایط محیطی، می‌توان استفاده از مقادیر کم افزودنی‌های بازیافتی به جای سیمان را در همه حالات توصیه نمود. چرا که در بدبینانه‌ترین حالت، احتمال دارد تا چند درصدی نیز از مقاومت نمونه کاسته شود، اما با توجه به ملاحظات اجرایی و ضرایب ایمنی در نظر گرفته شده توسط طراح، می‌توان از این مواد افزودنی بازیافتی استفاده نمود؛ بطوری که علاوه بر مسائل فنی، مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی نیز تا حد امکان مرتفع شود.

با نگاهی دیگر به نتایج حاصل از شکل ۶ می‌توان دریافت که در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های RP میانگین روند تغییرات مقاومت



شکل ۱۲. نمودار جذب آب مقایسه‌ای نمونه‌ها  
Fig. 12. Comparative Water Absorption diagram

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش جذب آب

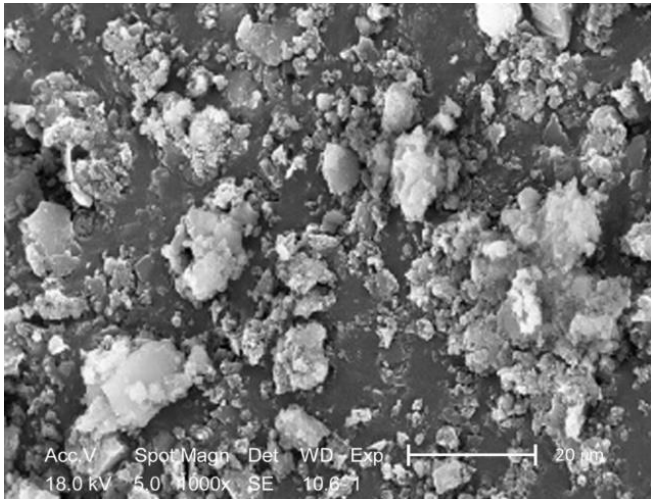
Table 3. Comparison of the results of the Water Absorption Test

تغییرات نسبت به نمونه شاهد (%)				طرح
۹۰ روزه	۵۶ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	
۰	۰	۰	۰	A
-۱۰/۵	-۱۰/۸	-۱۱	-۱۲	EP-7%
-۱/۹	-۲	-۲/۵	-۲/۷	EP-14%
-۳/۵	-۱	+۲/۳۱	+۵	EP-21%
+۹/۷	+۱۰	+۱۱	+۲۸	EP-28%
+۵/۹	+۷	+۷/۲	+۲۸	GP-7%
+۳/۹	+۵	+۶/۹	+۷/۸	GP-14%
+۰/۵	۰	+۴/۶	+۵/۳	GP-21%
-۱۰/۹	-۹	+۰/۵	+۱	GP-28%
-۳/۶	-۴	-۵/۳	-۷/۶	IP-7%
-۳/۴	-۵/۵	-۷/۷	-۸/۴	IP-14%
-۳/۴	-۴	-۵/۷	-۸/۷	IP-21%
-۱	-۱/۵	-۲/۸	-۹/۴	IP-28%
+۵/۴	+۷/۵	+۷/۹	+۸/۳	RP-7%
+۸/۹	+۹/۸	+۹/۸	+۳۹/۷	RP-14%
+۱۶/۳	+۱۷/۵	+۱۸/۸	+۴۷/۴	RP-21%
+۳۳/۷	+۳۶/۵	+۴۰	+۸۴/۲	RP-28%

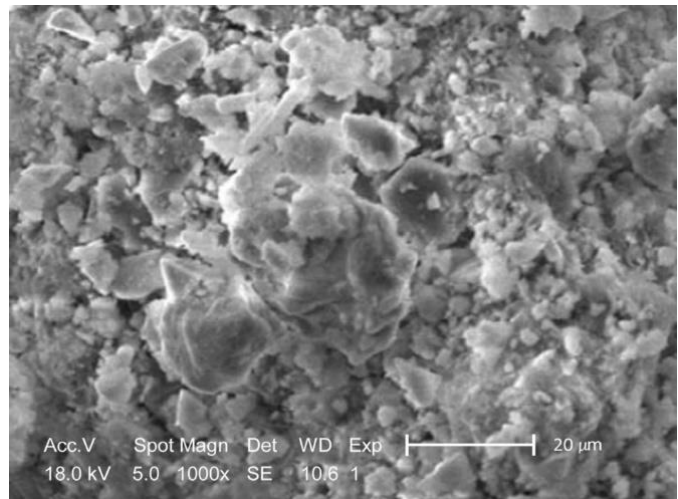
کوره قرارداده شده و سپس توزین گردیدند. این فرآیند تا آنجا ادامه پیدا کرده که تفاضل دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵٪ وزن خشک شود. آخرین توزین به عنوان وزن خشک نمونه یادداشت گردید. پس از خنک شدن تدریجی نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، برای بدست آوردن وزن نمونه اشباع با سطح خشک، نمونه‌ها به داخل حوضچه آب با دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد بازگردانده شدند. نمونه‌ها پس از گذشت حداقل ۴۸ ساعت از حوضچه مذکور خارج و پس از خشک کردن رطوبت سطحی توسط حوله خشک، توزین شدند. نمونه‌های مذکور دوباره به مدت ۲۴ ساعت در همان حوضچه نگهداری شده و سپس از حوضچه خارج گردیده و دوباره به همان شیوه قبلی توزین شدند. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف دو توزین

آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بر اساس استاندارد ASTM C642 [۳۰] انجام شد. از هر طرح سه نمونه مکعبی ساخته شده که جذب آب نهایی بر اساس میانگین گیری از مقادیر جذب آب بدست آمده برای هر نمونه محاسبه شد. نمونه‌ها را پس از عمل‌آوری در حوضچه‌های آب با دمای ثابت  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد، از آب خارج گردیده و پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، جهت تعیین وزن خشک در داخل کوره با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرارداده شدند. سپس نمونه‌ها از گرمکن خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم توزین شدند. پس از آن برای ۲۴ ساعت دیگر نمونه‌ها در

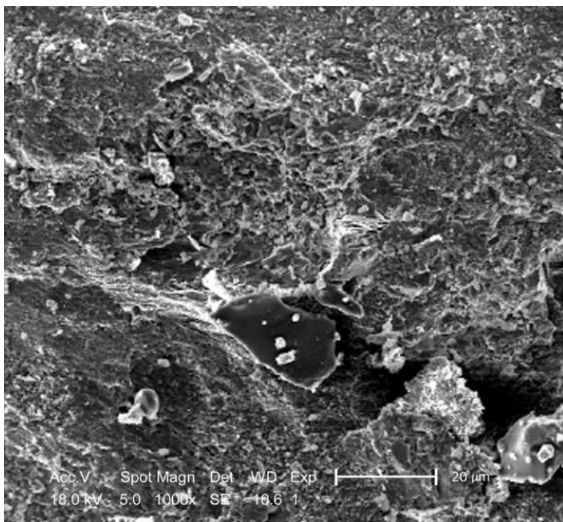




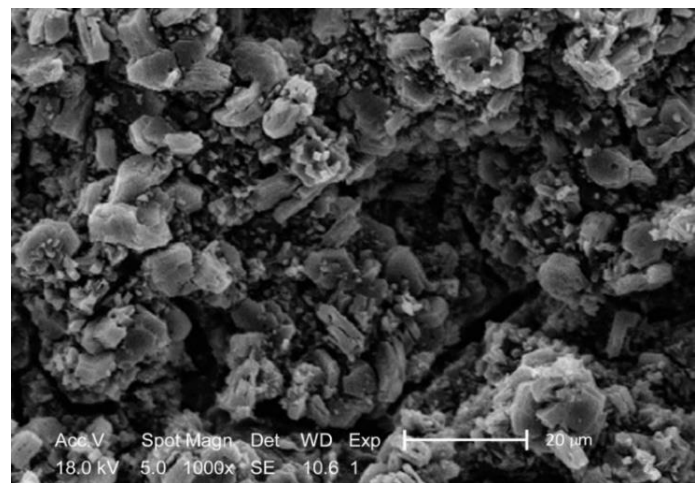
شکل ۱۴. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه GP-28%  
Fig. 14. SEM Photomicrographs of the specimen containing 28% GP



شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه EP-28%  
Fig. 13. SEM Photomicrographs of the specimen containing 28% EP



شکل ۱۶. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه RP-28%  
Fig. 16. SEM Photomicrographs of the specimen containing 28% RP



شکل ۱۵. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه IP-28%  
Fig. 15. SEM Photomicrographs of the specimen containing 28% IP

و ۹۰ روزه در اشکال ۸ تا ۱۱ آورده شده است. بطور کلی عمده تغییرات جذب آب نمونه‌ها با افزایش سن نمونه، بصورت افزایش بوده که بیشترین درصد افزایش مربوط به سن ۷ و ۲۸ روزه می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج، تغییرات چندانی در درصد جذب آب نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه رخ نداده است که می‌تواند به این علت باشد که ماده چسبنده اصلی نمونه‌های ملات ساخته شده

متوالی کمتر از ۵/۰٪ وزن سنگین‌تر باشد. در پایان، آخرین توزین به عنوان وزن اشباع با سطح خشک یادداشت گردیده و درصد جذب آب محاسبه شده است.

در شکل ۷ تصویر نمونه‌ها جهت انجام آزمایش جذب آب هنگامی که درون گرمکن الکتریکی قرار داده شدند، به نمایش در آمده است. نتایج حاصل از آزمایش جذب آب نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸، ۵۶

از نمونه شاهد بوده که بدین معنی است که افزودن پودر پوسته تخم مرغ و آهن سبب کاهش جذب آب ملات شده که این مقدار به ترتیب تا ۱۲ و ۹/۵% می‌باشد. با افزایش استفاده از پودر شیشه، به تدریج از مقدار جذب آب نمونه‌ها کاسته شده است، بنابراین انتظار می‌رود مقاومت فشاری و کششی به تدریج افزایش یابد. اهمیت استفاده از پودر پوسته تخم مرغ و آهن در ملات، در مقدار استفاده از ۷% بوده که در سن ۲۸ روزه جذب آب به مراتب کمتری نسبت به نمونه شاهد

سیمان پرتلند تیپ دو بوده که در سن ۲۸ روز به مقاومت و گیرش نهایی خود می‌رسد. اگر افزودنی‌های مصرفی انواع دیگری از قبیل میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی و غیره بودند، طبیعتاً نتایج در سنین ۵۶ و ۹۰ روزه به گونه‌ای دیگر می‌شد. بنابراین معیار ارزیابی را می‌توان بر حسب نتایج در سنین ۷ و ۲۸ روزه بررسی نمود. درصد جذب آب نمونه شاهد در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۹/۵ و ۱۹/۵% می‌باشد. درصد جذب آب نمونه‌های حاوی EP و IP کمتر

جدول ۴. مقایسه نتایج این مقاله با نتایج سایر محققان

Table 4. Comparison between the results of this Study and previous Research Works

تغییرات جذب آب نسبت به (%) A			تغییرات مقاومت کششی نسبت به A (%)			تغییرات مقاومت فشاری نسبت به A (%)			محققین
RP	GP	EP	RP	GP	EP	RP	GP	EP	
+۵/۴	-۱۰/۹	-۱۵/۵	+۱۴	+۳۰	+۴۹	+۱۷	+۳۶	+۲۸	پاچیده و قلهکی (این مقاله)
-	-	-	-	-	+۵	-	-	۰	گوسیکا و همکاران [۱۱]
-	-	+۲۳۱	-	-	-	-	-	-۸	بینیسی و همکاران [۱۲]
-	-	-۸	-	-	-	-	-	+۸/۶	یونگ تیونگ و همکاران [۱۳]
-	-	+۲	-	-	-	-	-	-۲۳	بالتو و همکاران [۱۴]
-	-	-	-	-	-	-	-۵	-	مافالدا ماتوس و سوساکوتینهو [۱۵]
-	-۳۴	-	-	-	-	-	-۵	-	پاتل و همکاران [۱۶]
-	-۸	-	-	+۱۲	-	-	+۶	-	علی‌ابدو و همکاران [۱۷]
-	-	-	-	-	-	-	+۳۳	-	چن و همکاران [۱۸]
-	-	-	-	-	-	-	+۹	-	شاو و همکاران [۱۹]
-	-	-	-	-	-	-	+۳۲	-	لیو و وانگ [۲۰]
-	-	-	-	-	-	-	+۵	-	وانگ و همکاران [۲۱]
-	-	-	-	-	-	-	۰	-	سای و همکاران [۲۲]
-	-	-	-	-	-	-۲۰	-	-	ایلماز و دگیرمنسی [۲۳]
-	-	-	-	-	-	+۹	-	-	هریانگ و همکاران [۲۴]
-۲	-	-	-	-	-	-	-	-	چنی و همکاران [۲۵]

کمتر و خصوصیات مکانیکی آنها بیشتر می‌باشد. همچنین ترک‌ها و شکاف‌های عمیق در بافت ساختاری نمونه GP کمتر و در نمونه IP (به علت وجود ترک خوردگی ظاهری) بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد.

#### ۴- مقایسه نتایج این مقاله با تحقیقات قبلی

از آنجایی که از دیرباز استفاده از مواد سیمانی طبیعی و یا موادی که خاصیت چسبندگی مناسبی دارند، در ترکیبات ملات یا بتن مورد توجه بوده است، لذا همواره سعی شده است تا آنجایی که امکان دارد به دنبال راهکاری جهت افزایش مقدار استفاده از این نوع مواد در ملات یا بتن بود. یکی از اهدافی که در این مقاله مدنظر بوده است، این است که بتوان طرح اختلاط و مواد افزودنی بازیافتی با اندازه ذرات مناسبی را به گونه‌ای با یکدیگر ترکیب نمود که بتوان مقدار استفاده از سیمان را کاهش داد و در عین حال، به مقاومت موردنظر نیز دست یافت. حال با توجه به این موضوع، برخی از نتایج این مقاله با بهترین و ایده‌آل‌ترین نتایج بدست آمده از محققان طی سالیان اخیر در جدول ۴ مورد ارزیابی و مقایسه واقع شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، طبق طرح اختلاط، اندازه ذرات افزودنی و مقدار جایگزینی آنها، تقریباً در تمامی آزمایشات نتایج بهتری نسبت به سایر محققین بدست آمده است که به عبارت دیگر، استفاده بهینه‌تری از مواد افزودنی بازیافتی شده است.

#### ۵- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی

با توجه به اینکه مقادیر بدست آمده از این پژوهش، از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی‌های درجه اول برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در جدول ۵ پیشنهاد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) تمامی روابط نزدیک به ۱ بوده، لذا روابط پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این روابط  $F'_C$  و  $F_T$  به ترتیب مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها و  $X$  پارامتر مربوط به درصد جایگزینی افزودنی به جای سیمان در ملات می‌باشد. لازم به ذکر است روابط فوق برای طرح اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا جهت ارائه روابط بیشتر در آینده قابل ارائه است. همچنین به کمک نتایج حاصل آزمایشات مقاومت فشاری و کششی، ارتباط بین آنها در شکل ۱۷ ارائه شده است.

در مقایسه با سن ۷ روزه دارد که این روند کاهشی در سنین بالاتر نیز رخ داده است.

به منظور درک بهتر و مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش جذب آب، نمودار تجمعی به صورت شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تمامی نمونه‌ها بیشترین تغییر در مقدار جذب آب مربوط به حدفصل سنین ۷ تا ۲۸ روز می‌باشد و در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه تغییرات چندانی در مقادیر جذب آب مشاهده نشده است. بطور کلی بیشترین و کمترین مقدار جذب آب مربوط به نمونه‌های RP و IP می‌باشد. همچنین در کلیه نمونه‌ها با افزایش مقدار افزودنی، مقدار جذب آب نیز افزایش یافته که به تبع آن از مقدار مقاومت‌های فشاری و کششی نیز کاسته خواهد شد، صرفاً در نمونه‌های GP با افزایش مقدار افزودنی در ملات، از مقدار جذب آب ملات کاسته شده است که به تبع آن مقاومت‌های فشاری و کششی نیز افزایش خواهند یافت. چرا که هر چه ملات یا بتن، دارای حفرات کمتری در بافت خود باشند، احتمال نفوذ خطرات شیمیایی و عوامل خارجی به درون آن کاهش یافته و مقاومت فشاری و کششی افزایش خواهد یافت. بنابراین هرچه نمونه ملاتی دارای مقدار جذب آب کمتری باشد، از پایداری بیشتری برخوردار می‌باشد.

همچنین نتایج حاصل از آزمایش جذب آب نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد در تمامی سنین، بطور خلاصه در جدول ۳ آورده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی نمونه‌ها با افزایش سن نمونه، مقدار جذب آب کاهش یافته است.

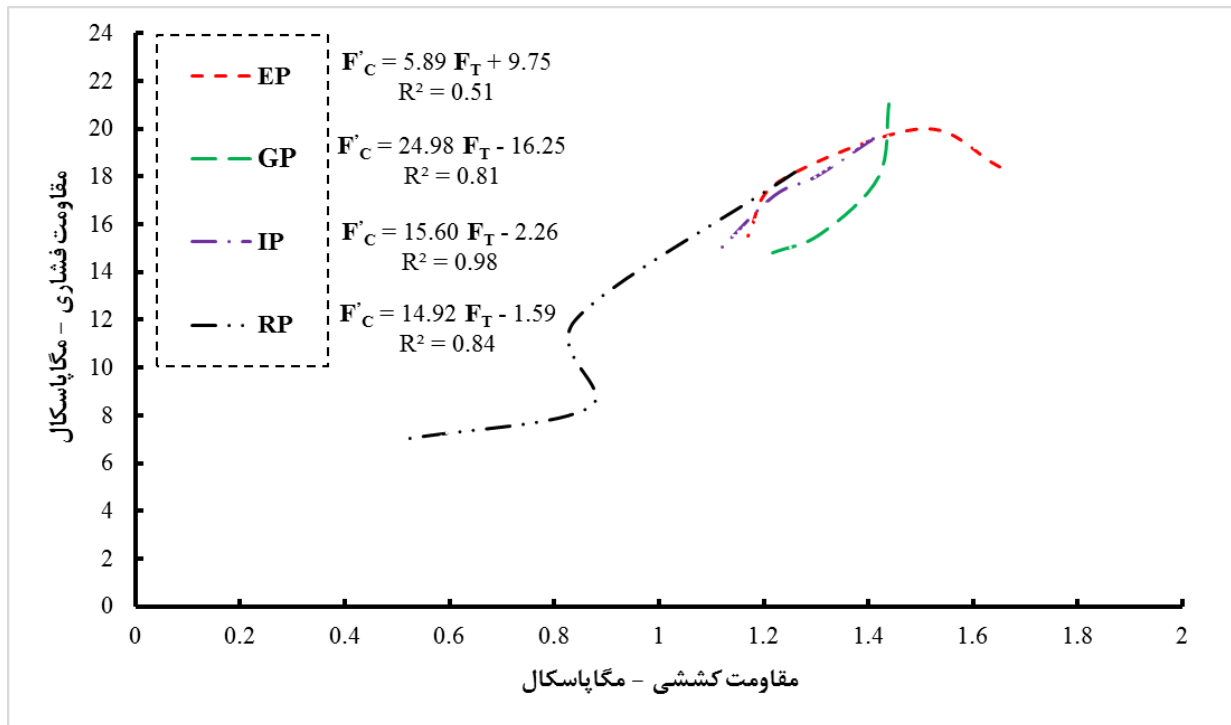
#### ۳-۴- آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

به منظور شناخت خواص ریزساختار نمونه‌ها، پنج سری نمونه شامل یک‌سری نمونه‌های بدون افزودنی (نمونه شاهد) و چهارسری نمونه‌های با ۲۸٪ جایگزینی افزودنی در سن ۲۸ روزه، در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان تحت آزمایش SEM قرار گرفتند. در واقع به کمک انجام این آزمایش می‌توان به ساختار درونی ملات حاوی مواد افزودنی بکار رفته پی برده و اثر هر یک را بر روی بافت ساختار ملات مشاهده نمود. در اشکال ۱۳ الی ۱۶ تصاویر بدست آمده از آزمایش SEM بر روی نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌های GP و IP از بافت یکپارچه تری نسبت به نمونه‌های EP و RP برخوردار بوده و بنابراین میزان جذب آب آنها

جدول ۵. روابط پیشنهادی جهت پیش‌بینی مقاومت نمونه‌ها

Table 5. Relationships for prediction of the Strength and Water Absorption Values

نوع آزمایش	طرح	روابط رگرسیون	ضریب رگرسیون ( $R^2$ )
مقاومت فشاری	EP	$F'_C = -0.16 X + 20.65$	0.77
	GP	$F'_C = +0.31 X + 12.00$	0.94
	IP	$F'_C = -0.22 X + 21.20$	0.96
	RP	$F'_C = -0.53 X + 20.7$	0.92
مقاومت کششی	EP	$F_T = -0.02 X + 1.82$	0.95
	GP	$F_T = +0.01 X + 1.15$	0.94
	IP	$F_T = -0.01 X + 1.51$	0.99
	RP	$F_T = -0.03 X + 1.43$	0.87



شکل ۱۷. رابطه بین مقاومت فشاری و کششی

Fig. 17. The relationship between compressive and tensile strength

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یکسری آزمایشات مقاومت فشاری (۲۸ روزه)، مقاومت کششی (۲۸ روزه)، جذب آب (۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه) و SEM بر روی نمونه‌های ملات که حاوی ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸٪ افزودنی‌های بازیافتی شامل پودرهای پوسته تخم‌مرغ، شیشه، آهن و لاستیک با سیمان جایگزین شدند، انجام شده که نتایج به صورت زیر حاصل شد:

- با افزودن ۷٪ پودر پوسته تخم‌مرغ، آهن و لاستیک به نمونه‌های ملات، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۸، ۲۶ و ۱۷٪ افزایش یافت، اما در نمونه‌های حاوی پودر شیشه، کاهش ۵ درصدی مشاهده شد که البته با افزایش درصد استفاده از پودر شیشه در ملات، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد تا حدود ۳۶٪ افزایش یافت. اما بطور کلی در سایر نمونه‌ها با افزایش میزان استفاده از پودرهای بازیافتی، مقاومت فشاری روندی کاهشی داشته اما همچنان بیشتر از نمونه شاهد می‌باشند. بیشترین روند کاهشی در نمونه‌ها، مربوط به نمونه‌های حاوی پودر لاستیک بوده که با افزایش مقدار استفاده از آن، مقاومت فشاری تا حدود ۶۰٪ کاهش یافته است که می‌تواند به علت عدم چسبندگی مناسب لاستیک با خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد. با این حال، بطور کلی استفاده از ۱۴٪ مواد بازیافتی در ملات‌های سیمانی روند مناسبی از مقاومت فشاری را دربر خواهد داشت.

- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های ملات، به جز نمونه‌های حاوی پودر لاستیک که فقط تا مقدار جایگزینی ۷٪ توصیه می‌شود، در مابقی نمونه‌ها می‌توان تا مقدار ۲۸٪ جایگزینی انتظار مقاومت کششی مطلوبی را داشت. به طوری که در مقدار ۲۸٪ جایگزینی، مقاومت کششی نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی پودر شیشه، پوسته تخم‌مرغ و آهن به ترتیب برابر ۱/۱۱، ۱/۴۴، ۱/۱۷ و ۱/۱۱ مگاپاسکال می‌باشد. با این وجود، تقریباً در تمامی نمونه‌ها، استفاده از ۷٪ مواد افزودنی در ملات، مقاومت کششی بیشتری ارائه خواهد داد.

- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش جذب آب، بطور کلی در تمامی نمونه‌ها بیشترین تغییر در مقدار جذب آب مربوط به حداقل سنین ۷ تا ۲۸ روزه بوده و در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه تغییرات چندانی در مقادیر جذب آب مشاهده نشده است. درصد جذب

آب نمونه شاهد در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۹/۵ و ۱۹/۵٪ می‌باشد. درصد جذب آب نمونه‌های حاوی EP و IP کمتر از نمونه شاهد بوده که بدین معنی است که افزودن پودر پوسته تخم‌مرغ و آهن سبب کاهش جذب آب ملات شده که این مقدار به ترتیب تا ۱۲ و ۹/۵٪ می‌باشد. همچنین با افزایش استفاده از پودر شیشه، از مقدار جذب آب نمونه‌ها تا حدود ۱۹٪ کاسته شده است.

## مراجع

- [1] B. Mazzilli, V. Palmiro, C. Saueia, M. B. Nisti, Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum, *J Environ Radioact*, 49 (2000) 113–122.
- [2] J. Somlai, V. Jobbagy, C. Nemeth, Z. Gorjanacz, N. Kavasi, T. Kovacs, Radiation dose from coal slag used as building material in the Transdanubian region of Hungary, *Radiat Prot Dosimet*, 118 (2006) 82–87.
- [3] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, H. Kaplan, Durability of mortar made with granite and marble as recycle aggregates, *J Mater Process Technol*, 208 (2008) 299–308.
- [4] H. Binici, Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on mortar properties, *Constr Build Mater*, 21 (2007) 1191–1197.
- [5] M. Karasahin, S. Terzi, Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete, *Constr Build Mater*, 3 (2007) 616–620.
- [6] H. Binici, H. Kaplan, S. Yılmaz, Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete, *Sci Res Essay*, 3 (2007) 372–379.
- [7] A. A. Manaseer, T. R. Dalal, Concrete containing plastic aggregates, *Concr Int*, 19 (1997) 47–52.
- [8] P. Soroushian, J. Plasencia, S. Ravanbakhsh, Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete, *ACI Mater J*, 100 (2003) 203–207.
- [9] M. Sivakumar, N. Mahendran, Strength and permeability properties of concrete using fly ash, rice husk ash and egg shell powder, *J Theoret Appl Inform Technol* 66 (2014) 489–499.



- E-glass particles used in cementitious mixtures, *Cem. Concr. Res.*, 36 (3) (2006) 449–456.
- [19] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cem. Concr. Res.*, 30 (1) (2000) 91–100.
- [20] S. Liu, G. Xie, S. Wang, Effect of glass powder on microstructure of cement pastes, *Adv. Cem. Res.*, 27(5) (2015) 259-267.
- [21] H. Y. Wang, H. H. Zeng, J. Y. Wu, A study on the macro and micro properties of concrete with LCD glass, *Constr. Build. Mater.*, 50 (2014) 664–670.
- [22] Y. Cai, D. Xuan, C. Sun Poon, Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars, *Construction and Building Materials*, 201 (2019) 295–302, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.186>.
- [23] A. Yilmaz, N. Degirmenci, Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials, *Waste Management*, 29 (2009) 1541–1546, doi:10.1016/j.wasman.2008.11.002.
- [24] W. Her Yung, L. Chin Yung, L. Hsien Hua, A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 665–672, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>.
- [25] A. A. Ghani, H. H. Alghazali, M. A. ElGawady, J. J. Myers, D. Feys, Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling, *Journal of Cleaner Production* 213 (2019) 1135-1146, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.260>.
- [26] ASTM C192 / C192M-18, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [27] Afnor (Association Française de Normalisation) NF EN 12390-13: testing hardened concrete: determination of secant modulus of elasticity in compression, (2013) Afnor, Paris, France.
- [28] ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
- [10] H. Binici, H. Temiz, H. S. Sevinc, M. Eken, A. Kucukonder, T. Ergul, Linear absorption coefficients of mortar samples made with the egg shell, *Kahramanmaraş Sutcu Imam Univ J Eng Sci*, 16 (2013) 7–11 (in Turkish).
- [11] D. Gowsika, S. Sarankokila, K. Sargunan, Experimental Investigation of Egg Shell Powder as Partial Replacement with Cement in Concrete, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 14(2) (2014) 65-68.
- [12] H. Binici, O. Aksogan, A. H. Sevinc, E. Cinpolat, Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement, sand and egg shells, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 1145-1150, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.020>.
- [13] H. Yong Tiong, S. Kang Lim, Y. Ling Lee, J. Hock Lim, Engineering Properties of 1200 kg/m<sup>3</sup> Lightweight Foamed Concrete with Egg Shell Powder as Partial Replacement Material of Cement, *E3S Web of Conferences* 65(02010) (2018) 1-10, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186502010>.
- [14] Y. Balto, R. Edwin Raj, J. Anne Chandra, S. C. Vettivel, Experimental investigation of discarded additive material combination and composition to appropriate thermal insulating properties of the composite cement mortar, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2019), DOI: 10.1080/19648189.2019.1577182.
- [15] A. Mafalda Matos, J. Sousa-Coutinho, Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 205–215, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>.
- [16] D. Patel, R. P. Tiwari, R. Shrivastava, R. K. Yadav, Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 406–415, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017>.
- [17] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, A. Y. Aboshama, Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Constr. Build. Mater.*, 124 (2016) 866–877.
- [18] C. H. Chen, R. Huang, J. K. Wu, C. C. Yang, Waste

Conshohocken, PA, (1990), [www.astm.org](http://www.astm.org).  
[30] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013), [www.astm.org](http://www.astm.org).

(Using 2 in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016), [www.astm.org](http://www.astm.org).  
[29] ASTM C190-85, Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, West

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. Pachideh, M. Gholhaki , (2021). A Study on Mechanical Properties, Water Absorption, and Microstructure of Cementitious Mortar containing Recycled Admixtures. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1743-1762

DOI: [10.22060/ceej.2020.17110.6463](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17110.6463)

