

## Experimental investigation of Porosity and Ultrasonic wave velocity impacts on the Mechanical Strengths of Cement-based Mortars containing Waste Foundry Sand

Sahar Mahdinia<sup>1</sup>, Mohammadreza Tavakkolizadeh<sup>2</sup>, Amir R. Masoodi<sup>2\*</sup>

1-Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

The use of recycled materials in construction has recently gained prominence as a strategy for promoting sustainability and reducing environmental impact. In this context, understanding the mechanical behavior of mortars incorporating waste aggregates and assessing their properties through non-destructive methods is essential for optimized mix design. This study investigates the relationship between flexural and compressive strengths with porosity and ultrasonic pulse velocity (UPV) at 28 days of curing. A total of 180 mortar specimens were prepared from 36 mix designs using three cement grades (32.5, 42.5, and 52.5 MPa), two types of aggregates (natural and waste foundry sand—WFS), two water-to-cement ratios (0.4 and 0.5), a constant sand-to-cement ratio (2.75), and six WFS replacement levels (0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% by weight). Results indicated inverse relationships between strengths and porosity: higher strength specimens had lower porosity. A direct relationship was observed between mechanical strengths and UPV, implying that higher strength corresponds to greater internal cohesion and faster wave transmission. The porosity–UPV relationship was found to be exponential and nonlinear. Moreover, flexural and compressive strengths were more closely aligned at lower water-to-cement ratios and higher cement grades. The lowest strength values consistently occurred at the 50% WFS replacement level. These findings offer valuable insights for designing eco-friendly mortars and enabling rapid, non-destructive performance evaluation.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 10 May 2025

Revise Date: 24 July 2025

Accept Date: 31 August 2025

### Keywords:

Cement-based mortar  
Waste foundry sand (WFS)  
Flexural strength  
Porosity  
Ultrasonic pulse velocity  
Compressive strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.518991.3706

\*Corresponding author: Amir R. Masoodi

Email address: [ar.masoodi@um.ac.ir](mailto:ar.masoodi@um.ac.ir)

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر تخلخل و سرعت امواج التراسونیک بر مقاومت‌های مکانیکی ملات پایه سیمانی حاوی سنگدانه ضایعاتی کوره فولاد

سحر مهدی نیا<sup>۱</sup>، محمدرضا توکلی زاده<sup>۲</sup>، امیررضا مسعودی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از مصالح بازیافتی به منظور توسعه پایدار و کاهش آثار زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز مورد توجه گسترده قرار گرفته است. از این رو، استفاده از سنگدانه‌های ضایعاتی کوره فولاد به عنوان جایگزین مصالح طبیعی، گامی مؤثر در کاهش اثرات زیست‌محیطی و مدیریت پسماندهای صنعتی است. در این راستا، شناخت رفتار مکانیکی ملات‌های حاوی سنگدانه‌های ضایعاتی و ارزیابی غیرمخرب خواص آن‌ها، ضرورتی انکارناپذیر برای طراحی بهینه مصالح نوین محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی نوآورانه رابطه تخلخل و سرعت انتشار امواج التراسونیک با مقاومت‌های خمشی و فشاری ملات‌های پایه سیمانی در سن ۲۸ روزه می‌باشد. بدین منظور، تعداد ۱۸۰ نمونه در قالب ۳۶ طرح اختلاط با استفاده از سه رده سیمان (۳۲/۵، ۴۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال)، دو نوع سنگدانه (طبیعی و ضایعات کوره فولاد)، دو نسبت آب به سیمان (۰/۴ و ۰/۵)، نسبت ثابت ماسه به سیمان (۲/۷۵) و شش مقدار درصد جایگزینی مختلف سنگدانه ضایعاتی (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪) تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی و فشاری با تخلخل رابطه‌ای معکوس و با سرعت امواج التراسونیک رابطه‌ای مستقیم دارند. همچنین رابطه میان تخلخل و سرعت امواج، غیرخطی و نمایی است. در شرایط نسبت آب به سیمان کمتر و رده مقاومتی بالاتر، مقدار مقاومت خمشی به مقاومت فشاری نزدیک‌تر است. همچنین، بیشترین کاهش مقاومت در نمونه‌هایی با ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه ضایعاتی مشاهده شد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در طراحی مخلوط‌های سیمانی سازگار با محیط زیست و ارزیابی سریع و غیرمخرب عملکرد مکانیکی آن‌ها نقش بسزایی ایفا کند.

کلمات کلیدی: ملات پایه سیمانی، سنگدانه ضایعاتی کوره فولاد، مقاومت خمشی، تخلخل، سرعت موج التراسونیک، مقاومت فشاری

| شناسه دیجیتال:  |                                | سابقه مقاله: |               |            |  |            |
|-----------------|--------------------------------|--------------|---------------|------------|--|------------|
| doi:            | 10.22065/jsce.2025.518991.3706 | چاپ          | انتشار آنلاین | پذیرش      | بازنگری  | دریافت     |
|                 | 10.22065/jsce.2025.518991.3706 | ۱۴۰۵/۰۱/۳۱   | ۱۴۰۴/۰۶/۰۹    | ۱۴۰۴/۰۶/۰۹ | ۱۴۰۴/۰۵/۰۲   | ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ |
| *نویسنده مسئول: |                                |              |               |            | امیررضا مسعودی   |            |
| پست الکترونیکی: |                                |              |               |            | <a href="mailto:ar.masoodi@um.ac.ir">ar.masoodi@um.ac.ir</a> |            |

## ۱- مقدمه

صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و عامل اصلی تخریب محیط زیست شناخته می‌شود [۱]. در پاسخ به نگرانی‌های فزاینده زیست‌محیطی، پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا با بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی در مصالح ساختمانی، اثرات مخرب زیست‌محیطی را کاهش داده و اصول اقتصاد چرخشی - بازیافتی را ترویج دهند [۲]. ماسه ضایعاتی کوره فولاد (WFS<sup>1</sup>) که حاصل فرآیند کوره فولاد فلزات است، به دلیل شباهت در اندازه ذرات و خواص مکانیکی، گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی ماسه طبیعی به‌شمار می‌آید [۳]. با این حال، به دلیل نوسانات ترکیب شیمیایی و نگرانی‌های مربوط به عملکرد مکانیکی، کاربرد آن در مواد پایه سیمانی هنوز محدود است [۴]. از سوی دیگر، رده مقاومتی سیمان (CSC<sup>2</sup>) نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سازه‌ای مصالح سیمانی دارد [۵]. اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی اثرات جداگانه ماسه ضایعاتی کوره فولاد و رده مقاومتی سیمان بر خواص ملات پرداخته‌اند [۶] [۷]، اما تأثیر ترکیبی آن‌ها بر مقاومت خمشی و فشاری تاکنون بررسی نشده است. هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی طرح اختلاط ملات با کمک بررسی درصدهای مختلف سنگدانه ضایعاتی [۸] به کار رفته در ساخت نمونه‌ی ملات در راستای حفظ منابع طبیعی و ارزش‌آفرینی از پسماندها است. یافته‌ها بینش‌های ارزشمندی از اثرات همزمان ماسه ضایعاتی کوره فولاد و رده مقاومتی سیمان ارائه داده و راهکارهای عملی برای ساخت و ساز پایدار فراهم می‌سازند.

شکل ۱، چرخه حیات و فرآیند بازیافت WFS را از استخراج تا استفاده مجدد در مصالح ساختمانی پایدار نشان می‌دهد. در ابتدا، سنگ معدن برای استخراج فولاد و کاربردهای صنعتی از جمله قالب‌سازی فلزات تصفیه می‌شود. این سنگ معدن در کوره فولاد به‌طور مکرر در قالب‌ها استفاده می‌شود تا زمانی که خاصیت مکانیکی و حرارتی خود را از دست داده و به پسماند تبدیل شود.



شکل ۱: چرخه حیات و فرآیند بازیافت سنگدانه ضایعاتی کوره فولاد از استخراج تا استفاده مجدد در مصالح ساختمانی پایدار

انباشت WFS مشکلات زیست‌محیطی و دفع پسماند گسترده‌ای به همراه دارد [۹]، چراکه مقدار زیادی از آن معمولاً در محل‌های دفن زباله تخلیه می‌شود [۱۰]. برای کاهش این اثرات، WFS تحت فرآیندهایی مانند شستشو، الک‌کردن و تصفیه شیمیایی قرار می‌گیرد تا ناخالصی‌های باقی‌مانده حذف شده و خواص آن برای استفاده مجدد در مصالح سیمانی بهبود یابد [۱۱]. پس از آماده‌سازی، WFS به‌عنوان جایگزین مناسبی برای مصالح طبیعی در ملات و بتن به‌کار می‌رود و از این طریق به ساخت و ساز پایدار کمک می‌کند [۱۲]. ادغام سنگدانه بازیافتی در کاربردهای سازه‌ای باعث ترویج ارزش‌آفرینی پسماند، حفظ منابع و تحقق اقتصاد چرخشی می‌شود [۱۳]؛ در نتیجه وابستگی به

<sup>1</sup> Waste Foundry Sand

<sup>2</sup> Cement Strength Class

مواد خام طبیعی اولیه کاهش یافته و توسعه زیرساخت‌های سازگار با محیط زیست تسهیل می‌گردد و در مناطقی که دسترسی به WFS وجود دارد به کاهش هزینه سازه کمک می‌کند [۱۴]. این نیاز رو به رشد به مصالح ساختمانی پایدار و با عملکرد بالا، پژوهشگران را به بررسی دقیق‌تر و پیدا کردن میزان بهینه سنگدانه ضایعاتی جایگزین سوق داده است. مقاومت خمشی و فشاری ملات سیمانی به‌طور مستقیم تحت تأثیر عواملی چون رده مقاومتی سیمان و استفاده از مصالح جایگزین مانند ماسه ضایعاتی کوره فولاد قرار دارد. مطالعات پیشین اثرات جداگانه WFS، CSC بررسی کرده‌اند، اما تاکنون پژوهشی که اثر ترکیبی آن‌ها را بررسی کند، انجام نشده است. از این‌رو، این مطالعه با هدف پر کردن این خلأ تحقیقاتی، به بررسی اثر هم‌زمان WFS و CSC بر مقاومت خمشی، فشاری، درصد تخلخل و سرعت موج التراسونیک ملات بهره گرفته است.

در مطالعه‌ای، کاظمی و همکارانش [۱۵] تأثیر CSC را بر مقاومت فشاری ملات بررسی کردند. در این پژوهش، شش نسبت آب به سیمان (W/C)، سه نسبت ماسه به سیمان (S/C) و سه رده مقاومتی سیمان مختلف در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که طراحی بهینه ملات وابسته به رده مقاومتی سیمان است. برای نمونه، برای سیمان ۳۲/۵ مگاپاسکالی و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۲۵، حداکثر مقاومت در نسبت ماسه به سیمان برابر ۲/۷۵ حاصل شد؛ در حالی‌که برای سیمان ۵۲/۵ مگاپاسکالی نسبت بهینه ماسه به سیمان برابر ۲/۵ بود. همچنین، ریز و همکارانش [۱۶] اثر سیمان‌های مختلف بر محیط زیست را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تولید سیمان با رده مقاومتی بالاتر به مصرف بیشتر انرژی نیاز دارد، زیرا دانه‌ها ریزتر هستند؛ اما به دلیل هیدراتاسیون بهتر و کاهش گازهای آلاینده، استفاده از آن‌ها از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی سودمندتر است. قائمی فرد و همکاران [۱۷] نیز تأثیر چرخه‌های ذوب-یخبندان بر ملات‌های دارای سیمان با رده‌های مقاومتی مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد ملات حاوی سیمان ۵۲/۵ مگاپاسکالی در برابر افت مقاومت در طول چرخه‌های یخبندان عملکرد بهتری دارد. کاهش مقاومت در این نمونه‌ها پس از ۵۰ و ۱۰۰ چرخه به‌مراتب کمتر از نمونه‌های با سیمان ضعیف‌تر بود. این مطالعات، بر اهمیت شناخت دقیق روابط بین رده مقاومتی سیمان، طرح اختلاط و عوامل محیطی جهت بهبود عملکرد ملات تأکید می‌کنند.

تأثیر پسماندهای صنعتی بر مقاومت فشاری بتن و ملات، موضوع مطالعات متعددی بوده است. در تحقیق پرابو و همکاران [۱۸]، جایگزینی تا ۲۰٪ سنگدانه طبیعی با ضایعات، اثری قابل توجه بر مقاومت نداشت، اما فراتر رفتن از این مقدار باعث افت عملکرد شد. ساروماتی و همکاران [۱۹] نیز نشان دادند که در نسبت آب به سیمان ۰/۴، جایگزینی ۳۰٪ از سنگدانه طبیعی با ضایعات تنها ۱/۹٪ افت مقاومت به همراه داشت. این مقدار در نسبت ۰/۵ به ۶/۱٪ افزایش یافت. سویک و همکاران [۲۰] دریافتند که جایگزینی بیش از ۱۵٪ سنگدانه طبیعی با ضایعات، افت قابل توجهی در مقاومت نسبت به نمونه‌های مرجع به‌همراه دارد. در مطالعه‌ای دیگر سریوستاوا [۲۱] به بررسی اثر سنگدانه‌های ضایعاتی زغال سنگ بر مقاومت فشاری و سرعت موج التراسونیک پرداخته‌اند. در این پژوهش طرح اختلاط‌های ارائه شده در دو نسبت مختلف ماسه به سیمان ۳ و ۵ می‌باشد که درصد جایگزینی سنگدانه طبیعی توسط سنگدانه ضایعاتی از ۲۰ درصد تا ۱۰۰ درصد است. نتایج نشان داد در تمامی درصدهای مختلف جایگزینی سنگدانه ضایعاتی سرعت موج با مقاومت فشاری یک رابطه مستقیم دارد ولی این رابطه خطی نیست و افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات به صورت نمایی بر روی سرعت موج التراسونیک تأثیر می‌گذارد. تأثیر سنگدانه ضایعاتی بر روی ویژگی‌های مکانیکی از جمله مقاومت خمشی، چگالی و تخلخل نمونه‌های ملات سیمان توسط گیلبرتو و همکارانش [۲۲] بررسی شده است. در این پژوهش نمونه‌هایی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان بین ۰/۵ تا ۰/۷ و درصدهای متفاوت سنگدانه ضایعاتی (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪) ساخته شده است. نتایج نشان داد که افزایش درصد سنگدانه ضایعاتی موجب افزایش تخلخل و جذب آب نمونه‌ها شده و همچنین مقاومت نمونه‌ها را تا بیش از ۲۵٪ کاهش می‌دهد.

در هیچ کدام از پژوهش‌های ذکر شده به اثر هم‌زمان رده مقاومتی سیمان و سنگدانه ضایعاتی کوره فولاد بر روی مقاومت و تخلخل و سرعت موج التراسونیک نپرداخته‌اند. این مطالعه با هدف بررسی هم‌زمان اثر سیمان‌های متفاوت و درصدهای مختلف سنگدانه ضایعاتی جایگزین بر روی مقاومت خمشی، فشاری و رابطه این مقاومت‌ها با تخلخل و سرعت موج التراسونیک طراحی شده است. از آنجایی که کار آزمایشگاهی گسترده با در نظر گرفتن سه رده مقاومتی مختلف سیمان و شش درصد جایگزین سنگدانه ضایعاتی با سنگدانه طبیعی و دو

نسبت متفاوت آب به سیمان مورد بررسی قرار گرفته نتایج از دقت بالایی برخوردار هستند و می توان در کارهای آزمایشگاهی آینده بدون صرف زمان و هزینه از نتایج این پژوهش استفاده کرد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش مواد و مصالح مصرفی و همچنین مراحل ساخت و عمل آوری نمونه‌ها معرفی شده است. که هر کدام از آن‌ها شامل زیربخش‌هایی می‌باشند که در قسمت مربوط به خود توضیح داده شده است.

### ۲-۱- مصالح مصرفی

این بخش که مربوط به معرفی مصالح مصرفی می‌باشد، تمامی مصالح را با جزئیات معرفی و بررسی کرده است. در بخش سیمان به معرفی انواع سیمان مصرفی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن پرداخته و در بخش سنگدانه هر دو نوع سنگدانه طبیعی و ضایعاتی به همراه ویژگی مدول نرمی و وزن مخصوص توضیح داده شده و در پایان شرایط آب مصرفی ارائه گردیده است.

### ۲-۱-۱- سیمان

برای ساخت نمونه‌ها از سیمان با سه رده مقاومتی متفاوت با مقاومت‌های ۳۲/۵، ۴۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکالی استفاده شده است. تمامی رده‌های سیمان مورد استفاده از کارخانه سیمان زاوه تربت بوده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان‌ها به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی سیمان

| آزمایش بتن<br>(cm <sup>2</sup> /gf) | آنالیز فیزیکی                     |                        |               | رده مقاومتی سیمان |
|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------|-------------------|
|                                     | وزن مخصوص<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | باقیمانده روی<br>90 mm | موقعیت<br>(%) |                   |
| 3200                                | 3.13                              | 0.75                   | زاوه تربت     | C 325             |
| 3450                                | 3.13                              | 0.60                   |               | C 425             |
| 3650                                | 3.15                              | 0.42                   |               | C 525             |

جدول ۲: ویژگی‌های شیمیایی سیمان

| آنالیز شیمیایی (%) |                   |                  |      |                 |                                |                                |                  |       |                            |
|--------------------|-------------------|------------------|------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|----------------------------|
| LiO                | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MgO  | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | رده مقاومتی<br>سیمان (MPa) |
| 1.40               | 0.29              | 0.66             | 2.38 | 2.20            | 3.74                           | 4.75                           | 20.83            | 63.75 | C 325                      |
| 1.08               | 0.27              | 0.63             | 2.41 | 2.25            | 3.79                           | 4.80                           | 21.13            | 63.79 | C 425                      |
| 0.81               | 0.24              | 0.6              | 2.43 | 2.30            | 3.72                           | 4.83                           | 21.29            | 63.82 | C 525                      |

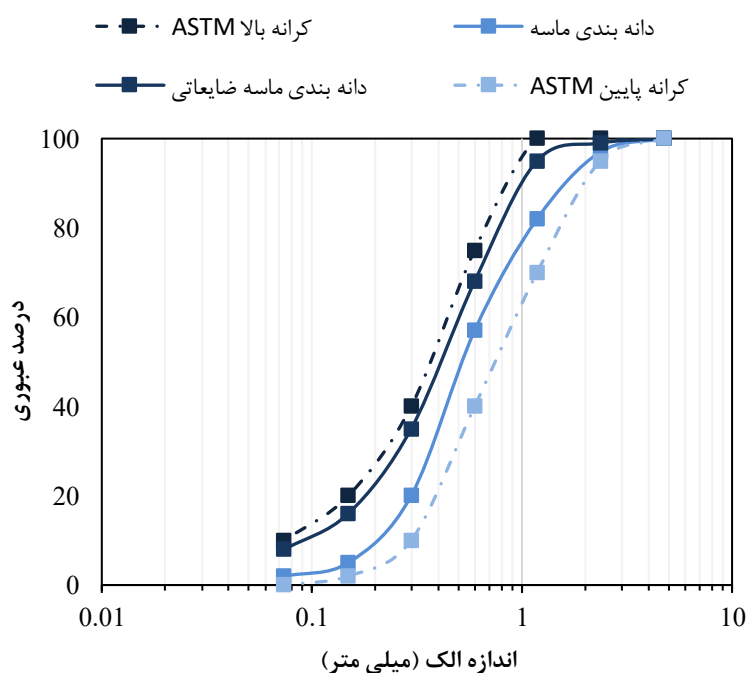
## ۲-۱-۲- سنگدانه

سنگدانه مصرفی برای ساخت نمونه‌های ملات سیمان از دو نوع سنگدانه طبیعی و ضایعاتی کوره فولاد مبارکه اصفهان بوده است که ویژگی‌های فیزیکی هر دو نوع سنگدانه اعم از وزن مخصوص و مدول نرمی آن‌ها در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳: ویژگی‌های فیزیکی مصالح ریزدانه

| مدول نرمی | وزن مخصوص |                         |
|-----------|-----------|-------------------------|
| ۲/۶۳      | ۲/۴۸      | ماسه طبیعی              |
| ۳/۲۱      | ۲/۴۰      | ماسه ضایعاتی صنعت فولاد |

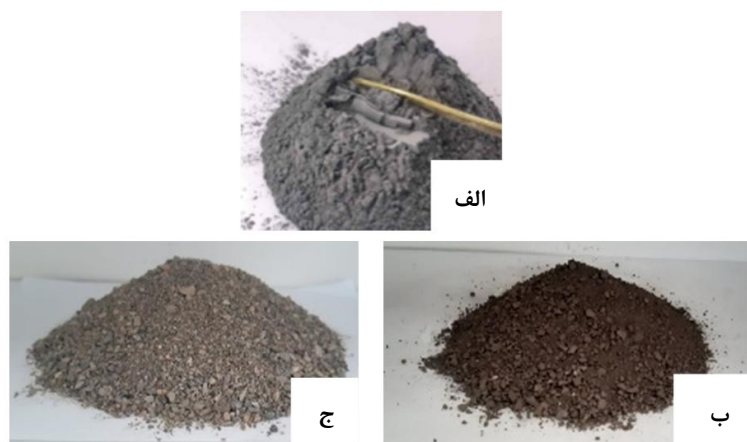
با توجه به اینکه طبق استاندارد ASTM C136-06 [۲۳] سنگدانه مورد استفاده در ساخت نمونه‌های ملات باید در محدوده مشخصی قرار گیرد و دارای دانه‌بندی استاندارد باشد، دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده و همچنین مرز بالا و پایین دانه‌بندی استاندارد در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: دانه‌بندی سنگدانه‌ی مورد استفاده

## ۲-۱-۳- آب

نمونه‌ها با آب شرب شهری مشهود ساخته شده‌اند و در شکل ۳ تمامی مصالح مصرفی در ساخت نمونه‌های ملات سیمان نشان داده شده است.



شکل ۳: مصالح مورد استفاده، (الف) سیمان، (ب) سنگدانه ضایعاتی کوره فولاد و (ج) سنگدانه طبیعی

## ۲-۲- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

در مجموع ۱۸۰ نمونه ملات سیمان از ۳۶ طرح اختلاط (۵ نمونه از هر طرح اختلاط) که با سه رده مقاومتی سیمان (۳۲/۵، ۴۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال)، دو نوع سنگدانه (طبیعی و ضایعاتی کوره فولاد)، یک نسبت ثابت ماسه به سیمان ۲/۷۵ و دو نسبت آب به سیمان (۰/۴ و ۰/۵) و ۶ درصد مختلف مصالح ضایعاتی (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪) مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت این نمونه‌ها در ابتدا نسبت ماسه به سیمان ۲/۷۵ لحاظ گردید و در این نسبت ثابت مقدار سنگدانه‌های طبیعی با درصدهای مختلفی از سنگدانه ضایعاتی جایگزین می‌شدند و روند ساخت نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C305 [۲۴] انجام شد. در طی ساخت نمونه‌ها ابتدا مقدار آب مورد نیاز در جام مخلوط کن ریخته شده سپس سایر مصالح از ریز به درشت به آب اضافه شدند و میزان فوق روان کننده ای که اضافه گردیده به مقداری بوده که بتواند آزمایش میز سیلان پس از ۲۵ ضربه به اندازه  $110 \pm 5$  دست یابد (ASTM C230) [۲۵].



شکل ۴: روند ساخت تا آزمایش، (الف) ملات ریخته شده درون قالب، (ب) نمونه‌های خارج شده از قالب، (ج) فرآوری نمونه‌ها داخل مخزن آب

پس از آن که ترکیب ملات به دست آمده در قالب‌های استاندارد ملات خمشی با ابعاد  $40 \times 40 \times 160$  میلی متر مکعب (ASTM C348-08) [۲۶] در دو لایه ریخته و کوبیده شدند. نمونه‌های ملات سیمان بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و به مدت ۲۸ روز در آب فرآوری و عمل آوری شدند و بعد از آن مورد آزمایش‌های مختلفی که در ادامه توضیح داده خواهد شد قرار گرفتند. شکل ۴ مراحل قالب ریزی، خارج کردن نمونه‌ها از قالب و عمل آوری آنها به مدت ۲۸ روز را نشان می‌دهد. همچنین، جزئیات طرح اختلاط‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: طرح اختلاط نمونه‌های ملات

| HRWR (ml) | W/C | %WFS (S + WFS) | S/C  | CSC (MPa) | No. | HRWR (ml) | W/C | %WFS (S + WFS) | S/C  | CSC (MPa) | No. |
|-----------|-----|----------------|------|-----------|-----|-----------|-----|----------------|------|-----------|-----|
| ۵۷        | ۰/۴ | ۳۰             | ۲/۷۵ | ۴۲/۵      | ۱۹  | ۲۶        | ۰/۴ | ۰              | ۲/۷۵ | ۳۲/۵      | ۱   |
| ۴۴        | ۰/۵ | ۳۰             |      |           | ۲۰  | ۶         | ۰/۵ | ۰              |      |           | ۲   |
| ۷۲        | ۰/۴ | ۴۰             |      |           | ۲۱  | ۴۰        | ۰/۴ | ۱۰             |      |           | ۳   |
| ۶۰        | ۰/۵ | ۴۰             |      |           | ۲۲  | ۲۰        | ۰/۵ | ۱۰             |      |           | ۴   |
| ۸۹        | ۰/۴ | ۵۰             |      |           | ۲۳  | ۵۵        | ۰/۴ | ۲۰             |      |           | ۵   |
| ۷۶        | ۰/۵ | ۵۰             |      |           | ۲۴  | ۳۵        | ۰/۵ | ۲۰             |      |           | ۶   |
| ۱۴        | ۰/۴ | ۰              |      | ۵۲/۵      | ۲۵  | ۷۲        | ۰/۴ | ۳۰             |      | ۷         |     |
| ۶         | ۰/۵ | ۰              |      |           | ۲۶  | ۵۳        | ۰/۵ | ۳۰             |      | ۸         |     |
| ۲۵        | ۰/۴ | ۱۰             |      |           | ۲۷  | ۹۲        | ۰/۴ | ۴۰             |      | ۹         |     |
| ۱۶        | ۰/۵ | ۱۰             |      |           | ۲۸  | ۷۲        | ۰/۵ | ۴۰             |      | ۱۰        |     |
| ۳۶        | ۰/۴ | ۲۰             |      |           | ۲۹  | ۱۱۷       | ۰/۴ | ۵۰             |      | ۱۱        |     |
| ۲۸        | ۰/۵ | ۲۰             |      |           | ۳۰  | ۹۶        | ۰/۵ | ۵۰             |      | ۱۲        |     |
| ۴۹        | ۰/۴ | ۳۰             | ۴۲/۵ | ۳۱        | ۱۹  | ۰/۴       | ۰   | ۱۳             |      |           |     |
| ۴۱        | ۰/۵ | ۳۰             |      | ۳۲        | ۶   | ۰/۵       | ۰   | ۱۴             |      |           |     |
| ۶۳        | ۰/۴ | ۴۰             |      | ۳۳        | ۳۰  | ۰/۴       | ۱۰  | ۱۵             |      |           |     |
| ۵۵        | ۰/۵ | ۴۰             |      | ۳۴        | ۱۸  | ۰/۵       | ۱۰  | ۱۶             |      |           |     |
| ۷۸        | ۰/۴ | ۵۰             |      | ۳۵        | ۴۳  | ۰/۴       | ۲۰  | ۱۷             |      |           |     |
| ۷۰        | ۰/۵ | ۵۰             |      | ۳۶        | ۳۰  | ۰/۵       | ۲۰  | ۱۸             |      |           |     |

## ۲-۳- آزمایش‌ها

این بخش شامل چهار آزمایش مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، درصد تخلخل و سرعت موج التراسونیک می‌باشد که هر آزمایش به تفصیل در ادامه آورده شده است.

### ۲-۳-۱- مقاومت خمشی

برای تعیین مقاومت خمشی، از آزمون خمش سه نقطه‌ای استفاده شده است (شکل ۵). به این منظور، نمونه‌های منشوری ملات که در طی ۲۸ روز عمل‌آوری قرار گرفته بودند، با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. ابعاد استاندارد این نمونه‌ها  $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$  میلی‌متر مکعب [۲۶] است که طول دهانه برای انجام این آزمایش ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و طبق معادله ۱ مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها محاسبه گردیده است.

$$R_f = \frac{1.5F_f \times L}{b^3} \quad (1)$$

که در این معادله  $F_f$  حداکثر نیروی وارد شده در لحظه شکست بر حسب نیوتن،  $l$  طول دهانه بین تکیه‌گاه‌ها،  $b$  طول نمونه و  $R_f$  مقاومت خمشی (بر حسب مگاپاسکال) می‌باشد.



شکل ۵: نمایی از دستگاه آزمایش مقاومت خمشی

### ۲-۳-۲- مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، از بخش‌های شکسته‌شده‌ی نمونه‌هایی استفاده شد که پیش‌تر در آزمایش مقاومت خمشی، مطابق با استاندارد ASTM C349-08 [27]، مورد استفاده قرار گرفته بودند. این روش در بسیاری از پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸، ۲۹]. پیش از انجام آزمایش، سطوح نمونه‌ها پس از خارج شدن از مخزن آب خشک شده و ذرات سست چسبیده به سطوح قابل بارگذاری جدا گردید. بارگذاری بر روی سطوحی که در زمان ساخت در تماس با قالب بوده‌اند اعمال شد (شکل ۶) و مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۲ به دست آمد.

$$F_c = 0.0625 P_c \quad (2)$$

در معادله‌ی بالا  $F_c$  مقاومت فشاری بر حسب کیلو پاسکال و  $P_c$  حداکثر بار فشاری اعمال شده بر حسب نیوتن است.



شکل ۶: نمایی از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

## ۲-۳-۳- تخلخل

برای به دست آوردن تخلخل نمونه‌ها از آزمایش محاسبه‌ی تخلخل ارشمیدس مطابق شکل ۷ استفاده شده است [۳۰]. روند انجام این آزمایش به گونه‌ای است که در ابتدا وزن نمونه‌های خشک ملات سیمان را به دست می‌آوریم ( $W_d$ )، سپس نمونه‌ها را در حالت مستغرق در سطل دستگاه ارشمیدس قرار داده به نحوی که سطل از زیر ترازو آویزان است و ترازو مقدار وزن مستغرق نمونه را نشان می‌دهد ( $W_w$ ) و در پایان نمونه از درون آب خارج می‌شود و سطح آن خشک می‌گردد و وزن کُشی می‌شود که به این حالت وزن نمونه در حالت اشباع با سطح خشک گفته می‌شود ( $W_{SSD}$ ) و مقدار تخلخل با استفاده از معادله‌ی ۳ محاسبه می‌گردد.

$$P = \left( \frac{W_{SSD} - W_d}{W_{SSD} - W_w} \right) \times 100 \quad (3)$$



شکل ۷: نمایی از آزمایش ارشمیدس

## ۲-۳-۴- آزمایش التراسونیک

برای ارزیابی غیرمخرب وضعیت داخلی نمونه‌های ملات سیمان، در ابتدا نمونه‌ها در فضای آزمایشگاه قرار گرفته تا با محیط هم‌دما شوند سپس آزمون سرعت موج التراسونیک بر پایه استاندارد ASTM C597-02 [۳۱] مطابق شکل ۸ بر روی آن‌ها انجام شد. در این روش، موجی از یک سر نمونه به داخل آن فرستاده شده و گیرنده‌ای در طرف مقابل زمان رسیدن موج را ثبت می‌کند. با داشتن فاصله‌ی میان دو ترانسدیوسر ( $L$  برحسب متر) و مدت زمان عبور موج ( $T$  برحسب ثانیه) سرعت انتشار امواج ( $V$  برحسب متر بر ثانیه) از رابطه‌ی ۴ به دست آمد.

$$V = \frac{L}{T} \quad (4)$$



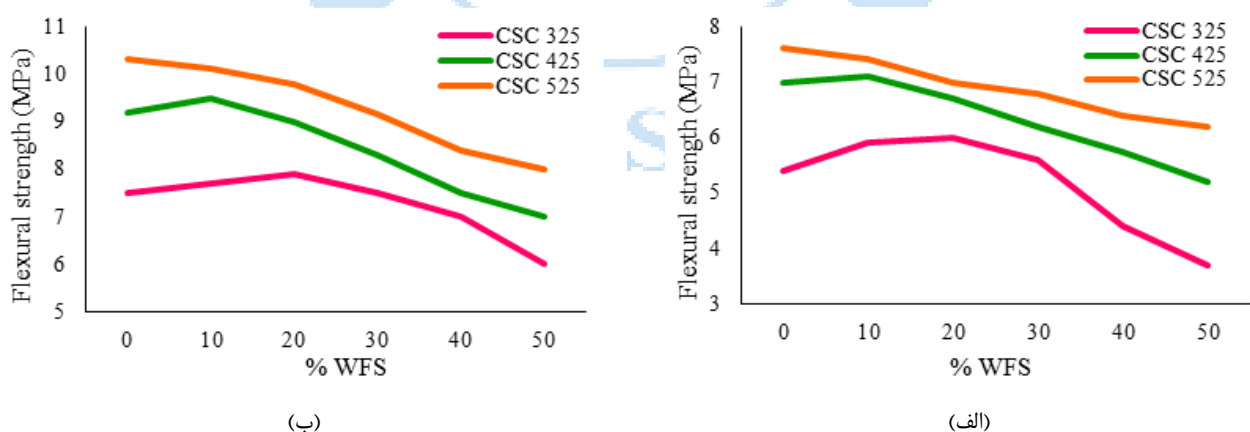
شکل ۸: نمایی از دستگاه آزمایش ترانسونیک

### ۳- تحلیل و تفسیر

در این بخش در ابتدا نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، درصد تخلخل و سرعت موج ترانسونیک ارائه شده و در ادامه نتایج مقایسه مقاومت خمشی و درصد تخلخل، مقاومت خمشی و سرعت موج ترانسونیک، مقاومت فشاری و درصد تخلخل و مقاومت فشاری و سرعت موج ترانسونیک گزارش شده است.

### ۳-۳-۱- مقاومت خمشی

شکل ۹ نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴ را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است مقادیر مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌هایی که با نسبت آب به سیمان ۰/۴ ساخته شده‌اند بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۵ می‌باشد. در هر دو نسبت آب به سیمان دیده می‌شود که با افزایش رده مقاومتی سیمان مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها افزایش یافته است ولی این روند خطی نیست و براساس یک رده‌ی مقاومتی سیمان نمی‌توان برای سایر سیمان‌ها مقدار مقاومت خمشی را به دست آورد.



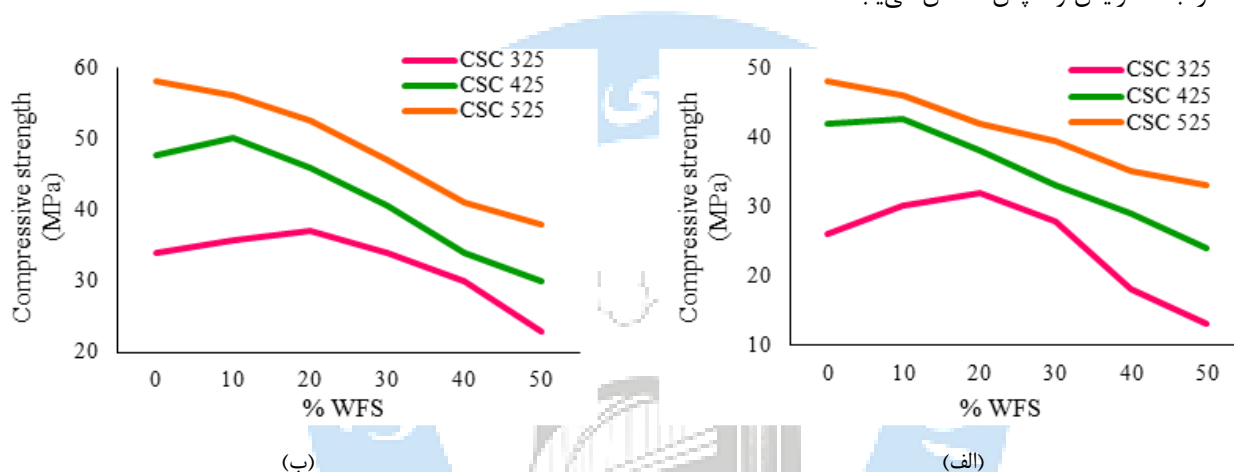
شکل ۹: نمودار مقاومت خمشی، (الف) W/C=0.5 و (ب) W/C=0.4

بر پایه شکل ۹، با افزایش درصد جایگزینی WFS، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش تخلخل و کاهش چسبندگی بین ذرات سیمان و سنگدانه ضایعاتی نسبت به سنگدانه طبیعی است که منجر به کاهش مقاومت مکانیکی ملات می‌شود. بیشترین

کاهش مقاومت در درصد ۵۰٪ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده محدودیت در استفاده از درصد‌های بالای سنگدانه ضایعاتی است. شکل ۹-ب که مربوط به نسبت آب به سیمان کمتر (۰/۴) است، نشان می‌دهد مقاومت خمشی بالاتری نسبت به شکل ۹-الف با نسبت آب به سیمان ۰/۵ دارد. این نتیجه مطابق با اصول مکانیک بتن است، چرا که کاهش نسبت آب به سیمان باعث کاهش تخلخل و افزایش چگالی ماتریس سیمانی شده و در نتیجه مقاومت مکانیکی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در نسبت آب به سیمان کمتر (۰/۴)، کاهش مقاومت خمشی با افزایش درصد WFS کمتر از نسبت ۰.۵ است، به عبارت دیگر ملات با  $W/C=0.4$  نسبت به جایگزینی سنگدانه ضایعاتی مقاومت بهتری نشان می‌دهد که تأکید بر اهمیت کنترل نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های سیمانی حاوی سنگدانه ضایعاتی است.

### ۳-۳-۲- مقاومت فشاری

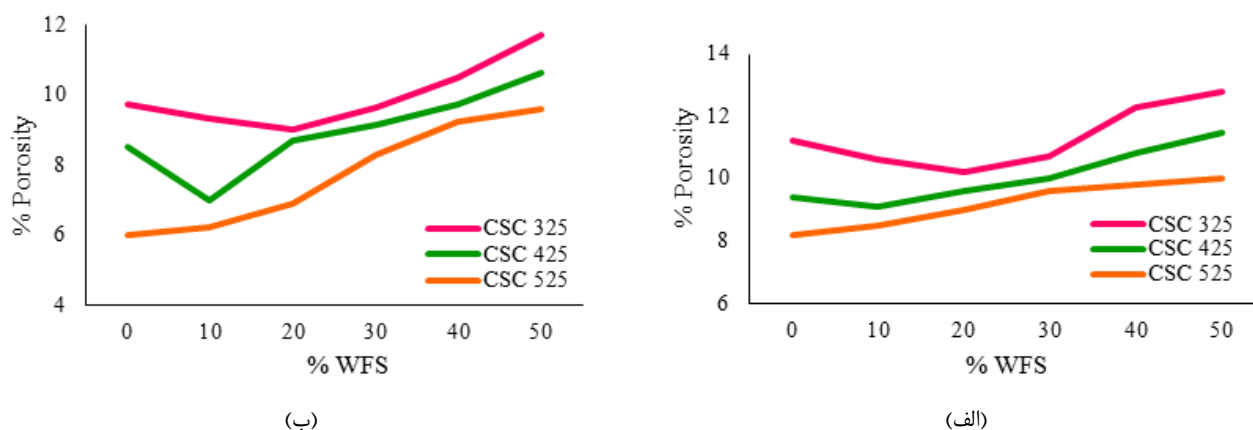
مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمان در سن ۲۸ روز در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به هر دو بخش شکل ۱۰ در هر دو نسبت آب به سیمان بیشترین مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمان مربوط به نمونه‌های ساخته شده با سیمان رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ مگاپاسکالی است و کمترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های ساخته شده با سیمان رده‌ی مقاومتی ۳۲/۵ مگاپاسکالی می‌باشد. در هر دو بخش دیده می‌شود که در نمونه‌های با سیمان رده مقاومتی پایین، با افزایش درصد سنگدانه‌ی ضایعاتی مقدار مقاومت نمونه‌ها در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰: نمودار مقاومت فشاری، (الف)  $W/C=0.5$  و (ب)  $W/C=0.4$

### ۳-۳-۳- تخلخل

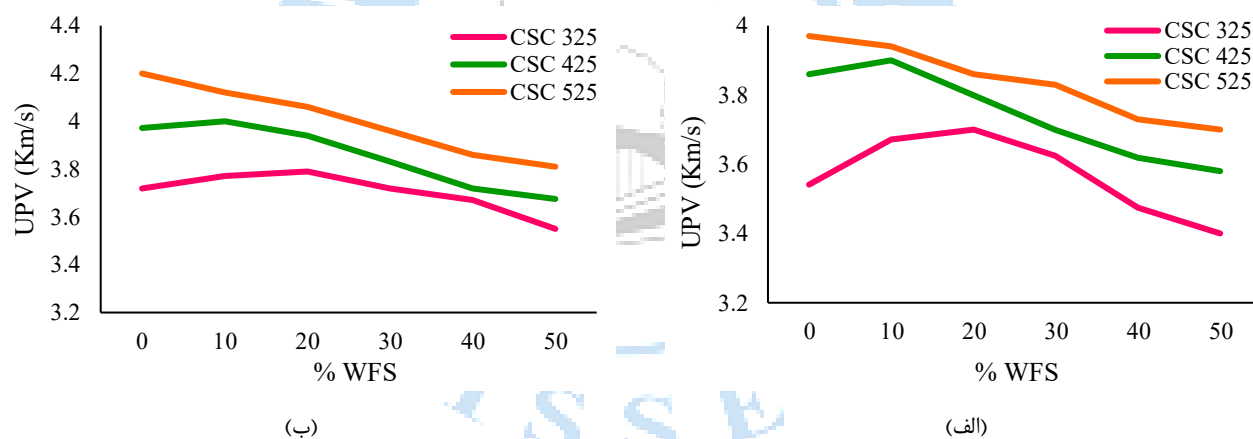
شکل ۱۱ دارای دو بخش الف و ب نشان‌دهنده‌ی میزان تخلخل نمونه‌های ملات سیمان است. بالاترین منحنی در هر دو بخش مربوط به سیمان با رده‌ی مقاومتی ۳۲/۵ مگاپاسکال است که نشان می‌دهد هر چه سیمان مصرفی در نمونه‌ها از رده‌ی مقاومتی پایین‌تری باشد نمونه‌های ساخته شده دارای تخلخل بیشتری هستند. با مقایسه‌ی دو بخش الف و ب دیده می‌شود که نمونه‌های ساخته شده با سیمان‌های با رده مقاومتی یکسان زمانی که نسبت آب به سیمان مختلف داشته باشند میزان تخلخل متفاوتی دارند و هر چه مقدار آب به سیمان بیشتر باشد تخلخل نمونه بیشتر می‌شود. میزان تخلخل بتن رابطه مستقیمی با درصد WFS دارد. برای نمونه، در CSC325 با  $W/C=0.5$ ، تخلخل از ۱۰٪ به ۶۰٪ افزایش می‌یابد. این رشد در بتن‌های پرعیار کندتر است) افزایش ۲۰٪ به ۴۰٪ در (CSC525 داده‌ها نشان می‌دهند هر ۱۰٪ افزودن WFS به‌طور میانگین ۸-۱۰٪ به تخلخل می‌افزاید. این افزایش تخلخل مستقیماً بر کاهش سرعت انتقال موج التراسونیک و مقاومت مکانیکی تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۱: نمودار تخلخل، (الف) W/C=0.5 و (ب) W/C=0.4

### ۳-۳-۴- سرعت موج التراسونیک

سرعت موج التراسونیک در دو بخش الف و ب شکل ۱۲ برای دو نسبت آب به سیمان متفاوت نشان داده شده است. در هر دو بخش دیده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی ماسه توسط سنگدانه‌ی ضایعاتی کوره‌ی فولاد در سیمان با رده مقاومتی ۵۲/۵ مگاپاسکالی سرعت موج کاهش می‌یابد و در دو رده‌ی دیگر به ترتیب از ۱۰٪ و ۲۰٪ این روند کاهشی مشاهده می‌شود. کاهش سرعت موج التراسونیک نشان دهنده‌ی ساختار ضعیف نمونه‌ها و مقاومت پایین آن‌ها است به همین دلیل در هر دو بخش الف و ب سیمان با رده‌ی ۵۲/۵ مگاپاسکال بیشترین و با رده‌ی ۳۲/۵ مگاپاسکال کمترین سرعت موج را دارند.



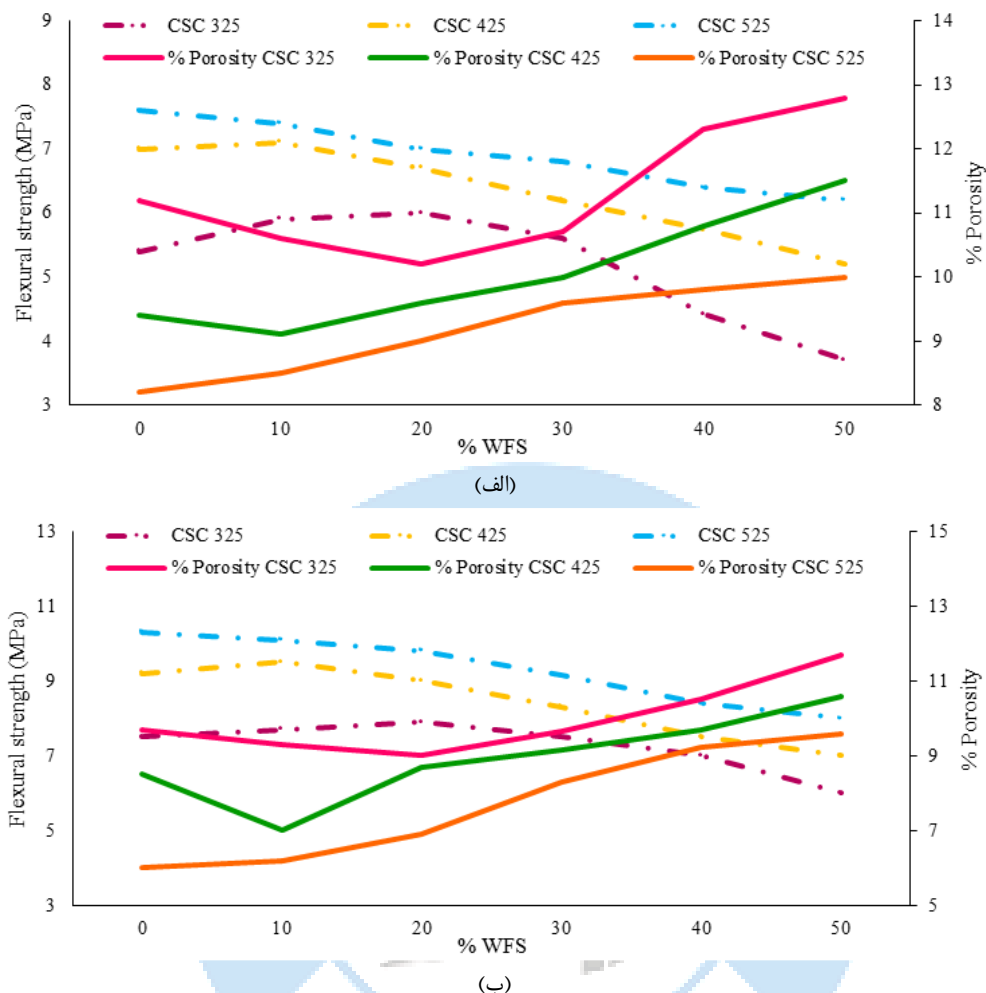
شکل ۱۲: نمودار التراسونیک، (الف) W/C=0.5 و (ب) W/C=0.4

افزایش درصد WFS موجب کاهش خطی سرعت انتقال امواج التراسونیک در بتن می‌شود. در بتن‌های کم‌عیار (CSC325) با W/C=0.5، افزایش WFS از ۰ به ۵۰٪، سرعت انتقال امواج التراسونیک را از ۴/۵ به ۲/۸ کیلومتر بر ثانیه (کاهش ۳۸٪) می‌رساند. این کاهش در بتن‌های پرعیار (CSC525) ملایم‌تر است (از ۵ به ۳.۵ کیلومتر بر ثانیه یا ۳۰٪ افت). به‌طور متوسط، هر ۱۰٪ افزایش WFS حدود ۱.۲ کیلومتر بر ثانیه از سرعت موج می‌کاهد که نشان‌دهنده تخریب پیشرونده یکپارچگی ساختار بتن است.

### ۳-۳-۵- مقایسه مقاومت خمشی و تخلخل

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ درصد‌های بالای جایگزینی ماسه با سنگدانه ضایعاتی کوره فولاد موجب کاهش مقاومت خمشی و افزایش درصد تخلخل نمونه‌های ملات سیمان شده‌اند. این تاثیر در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ بیشتر بوده و همچنین

در بین رده های مقاومتی سیمان بیشترین تخلخل مربوط به نمونه های ساخته شده با رده مقاومتی ۳۲/۵ مگاپاسکالی هستند. با مقایسه بخش الف و ب مشاهده می شود که کاهش نسبت آب به سیمان از ۵/۰ به ۴/۰ باعث بهبود ویژگی های مکانیکی ملات شده و اثر منفی سنگدانه ضایعاتی نسبت به افزایش تخلخل را کاهش می دهد.

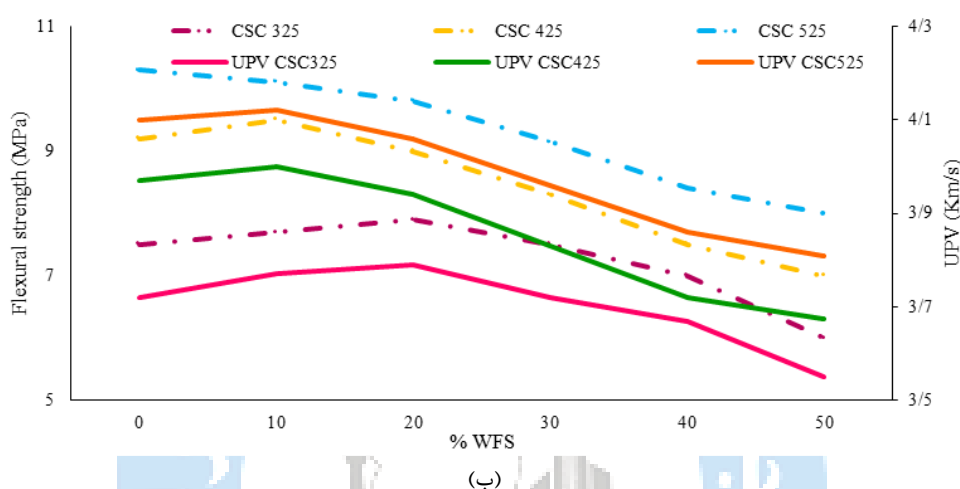
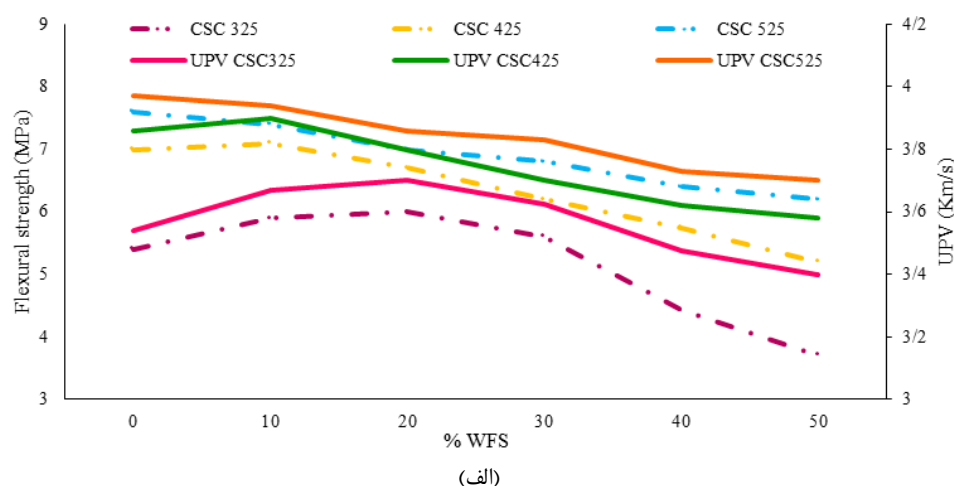


شکل ۱۳: نمودار مقایسه مقاومت خمشی و تخلخل، (الف)  $W/C=0.5$  و (ب)  $W/C=0.4$

افزایش WFS تا ۵۰٪ باعث کاهش محسوس مقاومت خمشی می شود، به طوری که در بتن های کم عیار (CSC325) افت تا ۶۷٪ و در بتن های پر عیار (CSC525) حدود ۳۹٪ مشاهده می شود. استفاده بیش از ۳۰٪ WFS برای بتن های با عیار پایین توصیه نمی شود، چرا که افت مقاومت شدید خواهد بود. با این حال، بتن های پر عیار حتی با ۵۰٪ WFS می توانند مقاومت مناسبی (حدود ۱۲ مگاپاسکال) حفظ کنند. کنترل دقیق درصد WFS و انتخاب عیار سیمان مناسب برای حفظ خواص مکانیکی ضروری است.

### ۳-۳-۶- مقایسه مقاومت خمشی و سرعت موج التراسونیک

نتایج حاصل از مقایسه مقاومت خمشی و سرعت موج التراسونیک در دو بخش الف و ب در شکل ۱۴ به صورت نمودارهایی با دو محور عمودی آورده شده است. نمودارها نشان می دهد که سرعت موج التراسونیک با میزان مقاومت خمشی رابطه کاملاً مستقیم دارد به طور مثال در نمونه های ساخته شده با سیمان رده مقاومتی ۵۲/۵ مگاپاسکالی که نمونه های قوی تری از لحاظ چسبندگی و مقاومت هستند میزان انتشار سرعت موج التراسونیک نیز بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است.



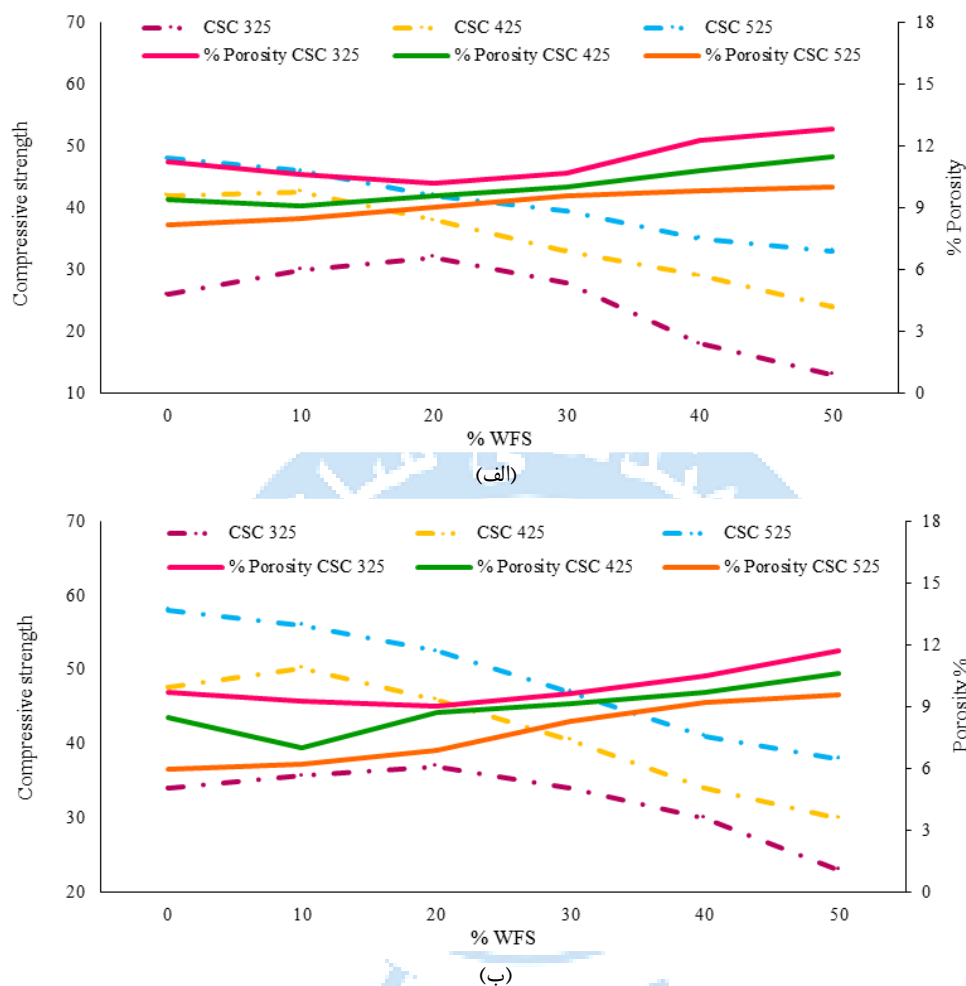
شکل ۱۴: نمودار مقایسه مقاومت خمشی و التراسونیک، (الف)  $W/C=0.5$  و (ب)  $W/C=0.4$

با افزایش درصد ماسه ریخته‌گری مصرف شده (WFS) از ۰ به ۵۰٪، مقاومت خمشی کلیه بتن‌ها (CSC 325 تا CSC 525) تحت هر دو نسبت آب به سیمان (۰.۴ و ۰.۵) کاهش نشان می‌دهد. برای بتن CSC 325 با  $W/C=0.5$ ، افزایش WFS تا ۵۰٪ موجب افت حدود ۶۰-۷۰٪ مقاومت خمشی) از ۱۲~ MPa به ۴~ MPa می‌شود. این روند در نسبت آب به سیمان ۰/۴ با شیب ملایم‌تری مشاهده می‌گردد، به طوری که مقاومت خمشی CSC 525 در این حالت از ۱۸~ MPa به ۱۰~ MPa کاهش می‌یابد. هم‌زمان، سرعت امواج اولتراسونیک (UPV) نیز با افزایش WFS افت می‌کند که نشان دهنده کاهش یکپارچگی ساختار داخلی بتن است. برای نمونه، UPV بتن CSC 425 با  $W/C=0.5$  از حدود ۴/۵ km/s به ۳/۲ km/s می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد عیار سیمان بالاتر (CSC 525) تأثیر منفی WFS را تا حدی جبران می‌کند. در  $W/C=0.4$ ، حتی با ۵۰٪ WFS، مقاومت خمشی CSC 525 حدود ۴۵٪ بالاتر از CSC 325 در همان شرایط است. همچنین، UPV این نمونه‌ها بالای ۴ km/s باقی می‌ماند که حاکی از تراکم نسبی بهتر است. با این حال، در تمام موارد، به ویژه در نسبت‌های بالای آب به سیمان، افزایش WFS بیش از ۳۰٪ منجر به افت شدید (> ۴۰٪) مقاومت خمشی می‌شود.

### ۳-۳-۷- مقایسه مقاومت فشاری و تخلخل

تحلیل داده‌های آزمایشگاهی حاصل از بررسی تاثیر ماسه ضایعاتی کوره فولاد به عنوان سنگدانه جایگزین در نمونه‌های ملات بر ویژگی‌های مقاومت فشاری و تخلخل در شکل ۱۵ آورده شده است. این منحنی‌ها نشان دهنده ی این است که درصد جایگزین ماسه ضایعاتی بر روی رفتار ویژگی‌های مکانیکی ملات یک رفتار خطی نیست. به عنوان مثال مقاومت فشاری در هر دو نسبت آب به سیمان با افزایش

درصد جایگزینی ماسه ضایعاتی در سیمان با رده مقاومتی ۵۲/۵ مگاپاسکالی روند کاهشی دارد ولی در سیمان با رده مقاومتی ۳۲/۵ مگاپاسکال این روند در ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است که می‌توان آن را به خاصیت پرکنندگی و تراکم پذیری سنگدانه ضایعاتی در نسبت‌های پایین جایگزینی در نمونه‌های حاوی سیمان با مقاومت کم مربوط کرد. در هر دو بخش الف و ب مشاهده می‌شود که درصد تخلخل با مقاومت فشاری رابطه عکس دارد به عنوان مثال در نسبت آب به سیمان ۰/۵ و درصد سنگدانه ضایعاتی جایگزین ۵۰٪ و سیمان با رده مقاومتی ۳۲/۵ مگاپاسکالی که کمترین مقاومت را داریم نمودار درصد تخلخل در بیشترین نقطه خود قرار دارد.

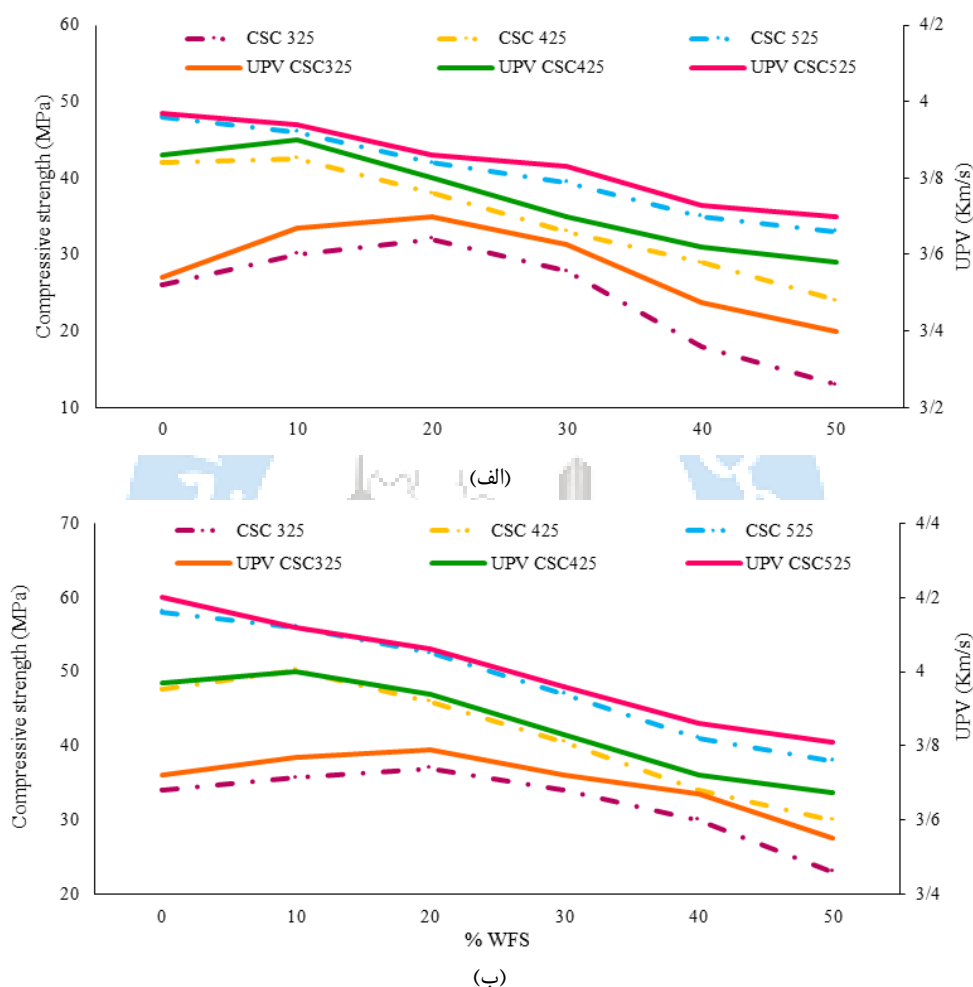


شکل ۱۵: نمودار مقایسه مقاومت فشاری و تخلخل، (الف) W/C=0.5 و (ب) W/C=0.4

با افزایش WFS در بتن، تخلخل به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، برای بتن CSC 325 با نسبت آب به سیمان ۰.۵، افزایش WFS از ۰ به ۵۰ درصد، تخلخل را از حدود ۱۰ درصد به بیش از ۶۰ درصد رسانده است. این روند در بتن‌های با عیار سیمان بالاتر (CSC 425 و CSC 525) نیز مشاهده می‌شود، اما با شیب کمتری. به‌طور کلی، استفاده از WFS بیش از ۳۰ درصد منجر به افزایش ناگهانی تخلخل می‌گردد که این امر به‌ویژه در نسبت‌های بالای آب به سیمان مشهودتر است. از سوی دیگر، مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد WFS کاهش می‌یابد. برای نمونه، در بتن CSC 525 با نسبت آب به سیمان ۰.۴، افزایش WFS از ۰ به ۵۰ درصد، مقاومت فشاری را از حدود ۱۸ مگاپاسکال به کمتر از ۶ مگاپاسکال کاهش داده است. این کاهش در بتن‌های با عیار سیمان پایین‌تر (CSC 325) حتی شدیدتر است، به‌طوری که در نسبت آب به سیمان ۰.۵، مقاومت فشاری به زیر ۳ مگاپاسکال می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که برای حفظ مقاومت قابل قبول، استفاده از WFS باید به کمتر از ۲۰ درصد محدود شود، مگر آن که از نسبت آب به سیمان پایین و عیار سیمان بالا استفاده گردد.

## ۳-۳-۸- مقایسه مقاومت فشاری و سرعت موج التراسونیک

بررسی اثر درصد مختلف ماسه ضایعاتی کوره فولاد بر مقاومت فشاری و سرعت موج التراسونیک در دو نسبت متفاوت آب به سیمان در دو بخش الف و ب شکل ۱۶ نشان داده شده است. روند نمودارهای مربوط به رده سیمان مختلف به کار رفته در ساخت نمونه‌ها نشان دهنده همبستگی و وابستگی بین مقاومت فشاری، میزان موج التراسونیک و درصدهای مختلف سنگدانه ضایعاتی جایگزین است. همبستگی مثبت بین مقاومت فشاری و سرعت موج به ویژه در محدوده بهیته سنگدانه ضایعاتی برای هر رده مقاومتی سیمان تاکید می‌کند که ساختار داخلی نمونه‌های ملات در این مقدار بهینه، متراکم‌تر و یکنواخت‌تر است و کاهش مقدار مقاومت فشاری و سرعت موج در محدوده‌ی خارج از درصد بهینه سنگدانه ضایعاتی ناشی از افزایش حفرات، ناپیوستگی داخلی بین نمونه‌ها، ضعف در ناحیه انتقالی خمیر سیمان با سنگدانه و افزایش ترک‌های داخلی است.



شکل ۱۶: نمودار مقایسه مقاومت فشاری و التراسونیک، (الف)  $W/C=0.5$  و (ب)  $W/C=0.4$

در بررسی نمودارهای ارائه شده، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه ریخته‌گری ضایعاتی (WFS)، هر دو پارامتر مقاومت فشاری (Compressive Strength) و سرعت پالس فراصوتی (UPV) در تمام نمونه‌ها کاهش می‌یابند. این کاهش در طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان بالاتر ( $W/C = 0.5$ ) محسوس‌تر است. به ویژه، مخلوط‌های دارای سیمان کمتر (CSC 325) نسبت به مخلوط‌های با سیمان بیشتر (CSC 525) افت بیشتری را تجربه می‌کنند که نشان‌دهنده حساسیت بالاتر این مخلوط‌ها به جایگزینی WFS است. افت مقاومت و کاهش UPV ناشی از افزایش تخلخل، کاهش چسبندگی بین WFS و خمیر سیمان، و افزایش احتمال تشکیل حفره‌های ضعیف در ساختار بتن است. با این حال، در برخی موارد نظیر UPV CSC325، افزایش اولیه تا ۲۰٪ WFS دیده می‌شود که ممکن است به

دلیل بهبود توزیع دانه بندی یا واکنش پوزولانی محدود باشد، ولی این اثر موقتی است و با افزایش بیشتر WFS از بین می رود. در طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان کمتر ( $W/C = 0.4$ )، مقاومت فشاری و مقدار UPV در سطوح بالاتری نسبت به  $W/C = 0.5$  قرار دارند، که بیانگر تراکم بالاتر و ساختار میکروسکوپی بهبود یافته است. همچنین کاهش مقاومت فشاری و UPV با افزایش WFS در این طرح کمتر و با شیب ملایم تری صورت می گیرد. این مسئله نشان می دهد که کاهش آب در مخلوط بتن می تواند بخشی از اثرات منفی WFS را جبران کرده و منجر به پیوند بهتر بین اجزای مخلوط شود. در هر دو نسبت  $W/C$ ، ترکیب حاوی ۵۲۵ کیلوگرم سیمان (CSC 525) بهترین عملکرد را از نظر مقاومت و UPV ارائه می دهد، که این امر نقش مثبت افزایش مقدار سیمان در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی WFS را تأیید می کند. به طور کلی، برای استفاده مؤثر از WFS در بتن، کنترل نسبت آب به سیمان و افزایش مقدار سیمان از راهکارهای کلیدی محسوب می شوند.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تمرکز اصلی بر تحلیل روابط میان مقاومت خمشی و فشاری با ویژگی های فیزیکی از جمله تخلخل و سرعت موج التراسونیک در ملات های پایه سیمانی حاوی سنگدانه های ضایعاتی است. آزمون ها بر روی نمونه هایی در سن ۲۸ روزه انجام گرفت تا عملکرد مکانیکی بلندمدت ارزیابی گردد. بدین منظور، تعداد ۱۸۰ نمونه از مجموع ۳۶ طرح اختلاط مختلف (۵ نمونه از هر طرح) ساخته شد. طرح های اختلاط با بهره گیری از سه رده سیمان با مقاومت های مشخصه ۳۲/۵، ۴۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال، دو نوع سنگدانه (سنگدانه طبیعی و ضایعات حاصل از کوره فولاد)، نسبت ثابت ماسه به سیمان برابر با ۲/۷۵، دو نسبت آب به سیمان (۰/۴ و ۰/۵) و شش سطح مختلف جایگزینی وزنی سنگدانه ضایعاتی (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) طراحی و بررسی شدند. یافته های این پژوهش، مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی، نشان دهنده روندهای مشخص و معناداری در ارتباط بین مقاومت مکانیکی، تخلخل و سرعت موج التراسونیک هستند که در ادامه به تفصیل ارائه می شوند:

- ۱- با توجه به نمودارها رابطه مقاومت خمشی و فشاری با درصد تخلخل همواره یک رابطه عکس می باشد و هر چه نمونه ها مقاومت بالاتری داشته باشند قطعاً درصد تخلخل پایین تری دارند.
- ۲- بر اساس تصاویر شامل نمودار، رابطه مقاومت خمشی و فشاری با سرعت موج التراسونیک همواره یک رابطه مستقیم است، به این معنا که هر نمونه ای که مقاومت بالاتری دارد پیوستگی داخلی بالاتری داشته و امواج سریع تر منتقل می شوند بنابراین میزان انتقال امواج التراسونیک بالاتری دارند.
- ۳- رابطه تخلخل و سرعت انتقال امواج التراسونیک یک رابطه عکس است ولی یک رابطه خطی نیست و به صورت غیرخطی و نمایی به یکدیگر مربوط می شوند که در نمودارها به وضوح دیده می شود. افزایش WFS تا ۵۰٪ باعث افزایش تخلخل (از ۱۰٪ به ۶۰٪) و کاهش سرعت انتقال امواج التراسونیک می شود. در بتن CSC325، سرعت انتقال امواج التراسونیک تا ۳۸٪ افت می کند (از ۴/۵ به ۲/۸ کیلومتر بر ثانیه)، در حالی که در بتن های پرعیار (CSC525) این کاهش حدود ۳۰٪ است. به ازای هر ۱۰٪ افزایش WFS، سرعت انتقال امواج التراسونیک حدود ۱/۲ کیلومتر بر ثانیه کاهش و تخلخل ۸-۱۰٪ افزایش می یابد. برای حفظ کیفیت بتن، توصیه می شود درصد WFS زیر ۳۰٪ نگه داشته شود.
- ۴- افزایش WFS تا ۵۰٪ موجب کاهش مقاومت خمشی در تمام بتن ها می شود، با شدت بیشتر در عیارهای پایین (CSC325) افت ۶۷٪ به ۴MPa) نسبت به عیارهای بالا (CSC525) افت ۳۹٪ به 11MPa). سرعت امواج اولتراسونیک نیز تا ۳۸٪ کاهش می یابد. استفاده بیش از ۳۰٪ WFS در بتن های با عیار پایین توصیه نمی شود، درحالی که بتن های پرعیار (CSC525) حتی با ۵۰٪ WFS در نسبت آب به سیمان ۰/۴ مقاومت مناسبی (12MPa) حفظ می کنند.
- ۵- نسبت های بالای آب به سیمان (مانند ۰/۵)، تأثیر منفی WFS تشدید شده و تخلخل حتی به بیش از ۶۰ درصد می رسد. حتی در بتن های با عیار سیمان بالا (CSC 525)، افزایش WFS تا ۵۰ درصد می تواند تخلخل را تا حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد افزایش دهد.

- ۶- با توجه به نمودارهای مقایسه‌ای، رابطه مقاومت خمشی و فشاری یک رابطه مستقیم است و در نسبت‌های آب به سیمان کمتر و رده مقاومتی بالاتر مقدار مقاومت خمشی به مقاومت فشاری نزدیک‌تر است. همچنین، افزایش WFS تا ۵۰٪ منجر به کاهش ۲۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت فشاری بسته به مقدار سیمان و نسبت W/C می‌شود.
- ۷- باید افزود، افزایش WFS تا ۵۰٪ منجر به کاهش سرعت انتقال امواج التراسونیک در حدود ۹ تا ۱۴ درصد است که نشان‌دهنده کاهش کیفیت ساختار داخلی بتن می‌باشد. همچنین، مشاهده گردید که تأثیر منفی WFS در نسبت W/C پایین‌تر و مقدار سیمان بالاتر کمتر است، که نقش مهم طرح اختلاط در کنترل این اثرات را تأیید می‌کند.
- ۸- رده‌های مختلف سنگدانه ضایعاتی جایگزین شده با سنگدانه طبیعی در رده‌های مقاومتی سیمان‌های مختلف تأثیر متفاوت دارد ولی در تمامی رده‌های سیمان کمترین مقاومت خمشی و فشاری مربوط به درصد جایگزینی ۵۰٪ می‌باشد که در نمودارهای مربوط به مقاومت فشاری و مقاومت خمشی این مسئله نشان داده شده است.

## منابع

1. Wu, E., X. Ma, C. Fang, N. Li, L. Jia, P. Jiang, and W. Wang, *Strength performance and microscopic mechanism of cement mortar incorporating fine recycled concrete aggregate and natural sand*. Journal of Building Engineering, 2025. **100**: p. 111767.
2. Pacheco-Menor, M.C., I. Flores-Colen, and J. de Brito, *The use of stone waste as fine aggregate or cement replacement in cement-based mortars: A review*. Journal of Building Engineering, 2025: p. 112503.
3. Pakkiyachandran, M. and N. Sathiparan, *Comparative study on quarry waste, manufactured sand, quarry dust as river sand replacement in cement mortar: mechanical characteristics, durability, and eco-benefit*. Materialia, 2025: p. 102395.
4. Pereira, N., D. Álvarez, B. Díaz, X. Estévez, R. Figueroa, X.R. Nóvoa, C. Pérez, and A. Pintos, *Mechanical, microstructural and electrical characterization of Portland cement mortars with foundry slags as sand replacement*. Journal of Building Engineering, 2025. **100**: p. 111786.
5. Mahdinia, S., H. Eskandari-Naddaf, and R. Shadnia, *Effect of Main factors on fracture mode of mortar, a graphical study*. Civil Engineering Journal, 2017. **3**(10): p. 897-90310.28991.
6. Magedi, F., J. Nseke, S. Siwal, W. Schmidt, A. Ghamari, T. Falayi, and T. Sithole, *From waste to worth: Assessing the feasibility of sodium aluminate as an activator for transforming steel slag modified waste foundry sand into a valuable resource*. Results in Engineering, 2025. **26**: p. 104554.
7. Mahdinia, S., H. Eskandari-Naddaf, and R. Shadnia, *Effect of cement strength class on the prediction of compressive strength of cement mortar using GEP method*. Construction and Building Materials, 2019. **198**: p. 27-41.
8. Kim, B., W. Jung, Y. Choi, and J. Lee, *Bayesian neural networks for predicting quality in reclaimed waste sand for foundry applications*. Journal of Manufacturing Systems, 2025. **79**: p. 584-597.
9. Cammelli, F., G. Tameni, and E. Bernardo, *Sustainable stabilization of waste foundry sands in alkali activated glass-based matrices*. Case Studies in Construction Materials, 2024. **21**: p. e03538.
10. García, G., R. Cabrera, J. Rolón, R. Pichardo, and C. Thomas, *Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete*. Construction and Building Materials, 2024. **430**: p. 13646.
11. Khan, M.M. and S. Mahajani, *Chemical reclamation of waste green foundry sand and its application in core production*. Sustainable Chemistry for Climate Action, 2024. **4**: p. 100038.
12. Jeyanthi, J., U. Karthikeyan, M.M. Raj, and M.K. Raj, *Study of concrete with partial replacement of waste foundry sand for fine aggregate and granite waste for coarse aggregate*. Materials Today: Proceedings, 2023.
13. Sun, Y., H. Zhang, L. Shan, R. Zheng, J. Bao, W. Wang, and P. Zhang, *Experimental investigation and mesoscale numerical analysis on water absorption in high-temperature-damaged lightweight aggregate concrete incorporating waste foundry sand*. Construction and Building Materials, 2024. **448**: p. 138239.

14. Liu, S., W. Zheng, and Y. Wang, *Utilization of waste foundry sand and fly ash in the production of steel fibre reinforced concrete*. Journal of Cleaner Production, 2023. **433**: p. 139872.
15. Eskandari-Naddaf, H. and R. Kazemi, *ANN prediction of cement mortar compressive strength, influence of cement strength class*. Construction and Building Materials, 2017. **138**: p. 1-11.
16. Reis, D.C., P.C. Abrão, T. Sui, and V.M. John, *Influence of cement strength class on environmental impact of concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 2020. **163**: p. 105075.
17. Ghaemi-Fard, M., H. Eskandari-Naddaf, and G.R. Ebrahimi, *Genetic prediction of cement mortar mechanical properties with different cement strength class after freezing and thawing cycles*. Structural Concrete, 2018. **19**(5): p. 1341-1352.
18. Prabhu, G.G., J.H. Hyun, and Y.Y. Kim, *Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production*. Construction and building materials, 2014. **70**: p. 514-521.
19. Sarumathi, K., S. Elavenil, and A. Vinoth, *Use of waste foundry sand with multiscale modeling in concrete*. Asian Journal of Civil Engineering, 2019. **20**: p. 163-170.
20. Çevik, S., T. Mutuk, B.M. Oktay, and A.K. Demirbaş, *Mechanical and microstructural characterization of cement mortars prepared by waste foundry sand (WFS)*. Journal of the Australian Ceramic Society, 2017. **53**: p. 829-837.
21. Srivastava, A., S. Singh, and C.S. Sharma, *Correlation between ultrasonic pulse velocity (UPV) and compressive strength of coal bottom ash mortar*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 2021. **102**: p. 421-433.
22. García Del Angel, G., J.A. Sainz-Aja, P. Tamayo, A. Cimentada, R. Cabrera, L.R. Pestana, and C. Thomas, *Effect of recycled foundry sand on the workability and mechanical properties of mortar*. Applied Sciences, 2023. **13**(6): p. 3436.
23. ASTM, C., *136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
24. ASTM, C., *305, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. ASTM International, 1999.
25. ASTM, C., *230, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.
26. ASTM, C., *348-08 Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA. 2002.
27. ASTM, C., *349-08 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA. 2009.
28. Polverino, S., A.E. Del Rio Castillo, A. Brencich, L. Marasco, F. Bonaccorso, and R. Morbiducci, *Few-Layers Graphene-Based Cement Mortars: Production Process and Mechanical Properties*. Sustainability, 2022. **14**(2): p. 784.
29. El Bitouri, Y. and D. Perrin, *Compressive and Flexural Strengths of Mortars Containing ABS and WEEE Based Plastic Aggregates*. Polymers, 2022. **14**(18): p. 3914.
30. ASTM, C., *830 Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA. 2009.
31. ASTM, C., *597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA. 2009.