

# امکان سنجی ساخت بتن سبک سازه‌ای با استفاده از سنگدانه‌های سبک لیکا و پلی‌اتیلن ترفتالات و تعیین خواص مکانیکی آن

سیدفتح اله ساجدی\*، علی لفته نعامی

گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

## چکیده

توجه به سبک‌سازی در ساختمان‌سازی نوین و نیاز به تولید و استفاده از بتن‌های سبک در ساختمان‌های بلند نیز باعث شده که محققان به استفاده از مصالح مصنوعی سبک روی آورند. هدف تحقیق این است که در تولید بتن سبک سازه‌ای، به جای استفاده از ماسه طبیعی، ماسه لیکا (۴-۰) mm جایگزین شود. بنابراین، چهار طرح مخلوط با ماسه لیکا و نسبت آب به سیمان در طرح‌های اول و سوم به میزان  $600 \text{ kg/m}^3$  و  $420 \text{ kg/m}^3$  و در طرح‌های دوم و چهارم به میزان  $200 \text{ kg/m}^3$  و  $350 \text{ kg/m}^3$  ساخته شدند. پس از تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، طرح مخلوط چهارم به عنوان طرح مرجع مشخص گردید. در ادامه سه طرح مخلوط جدید با جایگزین‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ از سنگدانه‌های پلی‌اتیلن ترفتالات و ماسه لیکا ساخته شدند. نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای استاندارد به ترتیب برای تعیین مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی تهیه و تا سن ۲۸ روزه در آب عمل‌آوری شدند. برای تمام طرح مخلوط‌ها، آزمایش‌های اسلامپ و وزن مخصوص در حالات تازه و سخت شده بتن انجام شدند. نتایج نشان داد که طرح دارای ۱۰٪ جایگزینی پلی‌اتیلن ترفتالات با ماسه لیکا، در مقادیر مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی به ترتیب به میزان ۱۸/۴٪ و ۶/۱٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع افزایش حاصل شده است. نتایج نشان دادند که می‌توان با استفاده از سنگدانه‌های پلی‌اتیلن ترفتالات، نسبت به ساخت بتن سبک سازه‌ای اقدام نمود، حتی به‌گونه‌ای که این نوع بتن دارای خواص مکانیکی برتر نسبت به بتن مرجع باشد.

**کلیدواژه‌ها:** بتن سبک سازه‌ای، سنگدانه‌های پلی‌اتیلن ترفتالات، امکان‌سنجی ساخت، خواص مکانیکی

\* Corresponding author; Email: fa.sajedi@iau.ac.ir; sajedi.ac@gmail.com

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی و سازه‌ای است. در دسترس بودن مصالح تشکیل دهنده، ساخت آسان، شکل پذیری (به شکل قالب در آمدن) و خمیری بودن، از مزایای مهم بتن به شمار می‌رود [۱]. بتن ترکیبی از سیمان، ماسه، شن و آب است که برای رسیدن به مقاومت ویژه، در نسبت‌های مختلف و مشخص مخلوط می‌شوند. در این اختلاط، آب و سیمان واکنش شیمیایی می‌دهند تا با تولید خمیر سیمان ذرات شن و ماسه را به هم چسبانده و با ایجاد بلورهای مقاوم سیلیکاته، مخلوط را به یک توده جامد با مقاومت فشاری تبدیل نمایند. در مخلوط بتن، ماسه به عنوان یک ریزدانه، جاگیری فوق‌العاده‌ای ایجاد، و با به کارگیری آن به عنوان پرکننده، مقاومت بتن را فراهم می‌کند [۲]. توسعه در صنعت ساخت و ساز در سراسر جهان در حال پیشرفت است و سازه‌های بسیار، مسکونی و غیرمسکونی در حال ساخت هستند، از این رو اهمیت بتن به عنوان ماده اصلی ساخت و ساز، هر روز در حال افزایش است [۳]. صنعت ساخت و ساز به مصالحی همچون سیمان، شن و ماسه، برای ساخت بتن وابسته است، و هزینه بالا و رو به افزایش این مصالح، مانع از توسعه ساخت سرنپناه و دیگر امکانات زیربنایی در کشورهای در حال توسعه است. برای توسعه زیربنای کل جهان، صنعت ساخت و ساز، نیازمند حجم بزرگی از مصالح خام است و نگرانی رو به رشد منابع رو به پایان و آلودگی جهانی، بسیاری از محققان و مهندسان را برای یافتن منابع مصالح دیگر که استفاده از مواد جایگزین را در ساخت و ساز شامل شود، به چالش کشیده است، و بسیاری از این مصالح، به عنوان سنگدانه، در بتن، مورد استفاده شود [۴].

در احداث ساختمان‌های بلند، باید به وزن سازه توجه نمود. حال با توجه به این موضوع که اجزاء این ساختمان‌ها اغلب اوقات از بتن ساخته می‌شوند، بهره‌گیری از بتن سبک باعث کاهش وزن این ساختمان‌ها می‌شود [۵]. ساخت بناهای سبک، مبحثی جدید در ساختمان‌سازی می‌باشد، که گسترش آن سبب به وجود آمدن روش‌های جدید در تولید بتن‌های سبک، خواهد شد [۶].

بتن‌های سبک از نظر مقاومت، به سه گروه شامل غیرسازه‌ای، نیمه سازه‌ای و سازه‌ای تقسیم می‌شوند. بتن سبک غیرسازه‌ای با وزن مخصوص  $800 \text{ kg/m}^3$  و پائین‌تر از آن، دارای مقاومت فشاری در محدوده  $(7 - 35) \text{ MPa}$  است. از معروف‌ترین سنگدانه‌های مصرفی در این نوع بتن می‌توان به پومیس اشاره کرد. این نوع بتن، می‌تواند در اجزاء مختلف ساختمان، استفاده شود [۷].

بتن‌های سبک با مقاومت متوسط، یا بتن سبک نیمه سازه‌ای، از لحاظ وزن مخصوص و مقاومت فشاری در محدوده‌ای بین بتن‌های سبک غیرسازه‌ای و سازه‌ای قرار دارند، به گونه‌ای که مقاومت فشاری آنها در محدوده  $(7 - 17) \text{ MPa}$  و جرم مخصوص آنها در محدوده  $(800 - 1400) \text{ kg/m}^3$  است [۸]. بتن‌های سبک موجود در این طبقه عمدتاً از نوع بتن‌های سبکدانه و بتن‌های با ساختار باز می‌باشند و به عبارت دیگر برای کاهش چگالی بتن، از سنگدانه‌های سبک طبیعی یا مصنوعی، استفاده شده است. بتن‌های سبک سازه‌ای، دارای چگالی در محدوده  $(1400 - 1900) \text{ kg/m}^3$  و مقاومت فشاری بیش از  $17 \text{ MPa}$  هستند و در بعضی حالات، امکان افزایش مقاومت تا  $60 \text{ MPa}$  نیز وجود دارد [۹]. هدف پژوهشگران دستیابی به بتنی است که علاوه بر سبک بودن، مقاومت قابل قبولی نیز داشته باشد به نحوی که نیاز روز افزون صنعت ساختمان را به مقاومت بالا از سویی، و هزینه تولید پایین را از سوی دیگر، تامین کند.

بتن سبک علاوه بر آن که نیروهای وارد از طرف زلزله را کاهش می‌دهد، می‌تواند، در مقایسه با بتن معمولی، عایق بهتری از نظر تبادل حرارت و صوت باشد [۱۰]. پیش‌بینی‌ها حاکی از کاربرد بیشتر بتن سبک در آینده است. بتن را می‌توان یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان به حساب آورد و ضرورت توسعه آن نیز روز به روز افزایش می‌یابد [۱۱]. هم‌چنین امروزه در پی گسترش صنعت ساخت و ساز در کشور و نیاز به ایجاد سازه‌های حیاتی، افزایش دقت و ایمنی در تولید و اجرای سازه‌های مهندسی، امری ضروری می‌باشد. از جمله راهکارهای مناسب، می‌توان به دستیابی به روش‌ها و ترکیب‌های جدیدی از مصالح ساختمانی جهت تسهیل پروژه‌های پیچیده به منظور افزایش ضریب اطمینان و ایمنی ساخت آنها از طریق مکانیزه کردن امور و کاهش دخالت نیروی انسانی اشاره نمود که مورد مذکور در تقلیل هزینه‌های مالی ساخت و نگهداری طرح‌های پرخرج، نقش بسزایی خواهد داشت [۱۲]. با گسترش استفاده از بتن، ویژگی‌هایی همچون دوام، کیفیت، تراکم و بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. یکی از عواملی که باعث شناخته شدن بتن به عنوان مصالحی مناسب شده

است، امکان ساخت و تهیه بتن از مصالح متفاوت، از جمله ضایعات و مواد بازیافتی می‌باشد. استفاده از مواد بازیافتی متفاوت در بتن، علاوه بر تاثیرات مختلفی که بسته به خواص ماده می‌تواند داشته باشد، به پاکسازی و کاهش آلودگی محیط زیست نیز کمک شایانی می‌نماید [۱۳]. با توجه به این که پلاستیک‌های ضایعاتی و مواد متشکل از پلاستیک همواره در محیط زیست باقی می‌ماند، لذا همواره یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در اطراف کلان شهرها در هر کشوری بازیافت و استفاده مجدد از این ضایعات انبوه می‌باشد [۱۴]. با توجه به این موضوع، یکی از انواع مختلف پلاستیک‌ها، پلی‌اتیلن ترفتالات<sup>۱</sup> می‌باشد که به شکل‌های مختلفی از جمله بطری در سراسر جهان تولید شده و به صورت انبوه استفاده می‌شود [۱۵]. در چند دهه اخیر پژوهش‌هایی برای استفاده مجدد از پلاستیک‌های فرسوده انجام گرفته است. یکی راهکارهای پیشنهادی برای بازیافت و استفاده مجدد از این پلاستیک‌های ضایعاتی در عرصه مهندسی عمران، می‌تواند بهره‌برداری در تولید بتن باشد [۱۶]. لذا بررسی ضایعات PET بر خواص انواع بتن از جمله بتن سبک سازه‌ای، جالب توجه بوده و در این مسیر پژوهش‌هایی نیز صورت گرفته است [۱۷]. رامسس و همکاران<sup>۲</sup>، در پژوهشی به مقایسه خواص بتن سبک حاوی پلی‌اتیلن بازیافتی و سنگدانه‌های رسی منبسط شده پرداختند و مشاهده کردند که ترکیب بتن با چگالی  $kg/m^3$  (۱۹۵۰-۲۰۵۰) با سنگدانه‌های زباله پلاستیکی پلی‌اتیلن با چگالی بالا<sup>۳</sup> و زباله پلاستیکی پلی‌اتیلن با چگالی کم<sup>۴</sup>، دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالاتر از ۴۰ MPa است [۱۸].

آوچارون و چوتیکای<sup>۵</sup>، به مطالعه اثرات نسبت آب به سیمان و سنگدانه‌های پلاستیک<sup>۶</sup> بازیافت شده از PET و ضایعات HDPE، بر خواص مکانیکی، فشاری و دوام بتن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۶۲ و میزان ۱۰٪ از سنگدانه‌های PET، مقاومت فشاری، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و نفوذ یون کلرید، به ترتیب ۲۱/۰٪، ۱۲/۱٪ و ۱۷/۳٪ در مقایسه با نمونه بتن حاوی سنگدانه‌های معمولی، کاهش یافت [۱۹].

در ادامه تحقیقات در زمینه بتن‌های حاوی PET، قربانی و ابوطالب<sup>۷</sup>، به بررسی اثر افزودن ضایعات خرد شده PET جایگزین شده سیمان در بتن خودتراکم حاوی متاکائولین و میکروسیلیس پرداختند و دریافتند که با افزایش درصد ذرات PET، وزن مخصوص بتن نیز تا حدودی کاهش می‌یابد، به طوری که با جایگزینی ۱۰٪ ذرات PET، حدود ۶٪ کاهش چگالی بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۷٪ کاهش در چگالی بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ وجود خواهد داشت [۲۰].

همچنین آخالی و همکاران<sup>۸</sup>، مطالعه تجربی، پیرامون استفاده از ضایعات PET به عنوان جایگزینی برای سنگدانه درشت در تولید بتن سبک، انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سنگدانه‌های PET باعث تولید بتن با کاهش مقاومت فشاری در محدوده ۲۶ - ۳۹٪ و کاهش جذب آب در محدوده ۲ - ۳۲٪ نسبت به بتن معمولی می‌شود. و آزمایش سرعت سرعت ضربه ماوراء صوت<sup>۹</sup> نشان داد که بتن با سنگدانه‌های PET در مقایسه با بتن معمولی، سرعت انتشار موج کمتری دارد. علاوه بر این، آزمایش کشش چکش اشمیت و شکاف، نشان داد که بتن با سنگدانه‌های PET در مقایسه با بتن معمولی دارای تعداد برگشت و مقاومت کششی کمتری است. همچنین با جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه PET، وزن مخصوص به ترتیب  $kg/m^3$  ۲۲۱۹ و  $kg/m^3$  ۲۱۰۹ شد که با توجه به آنها، استفاده از بتن سبک را رد می‌کند. با این حال، با ۱۰۰٪ جایگزینی PET، بتن دارای وزن مخصوص  $kg/m^3$  ۱۸۵۵ با مقاومت فشاری ۱۴/۱۶ MPa بود که می‌تواند به عنوان بتن سبک سازه‌ای متوسط طبقه‌بندی شود [۲۱].

<sup>1</sup> Polyethylene Terephthalate (PET)

<sup>2</sup> Rumšys et al.

<sup>3</sup> High-Density Polyethylene (HDPE)

<sup>4</sup> Low-Density Polyethylene (LDPE)

<sup>5</sup> Aocharoen and Chotickai

<sup>6</sup> Plastic Aggregates (PAs)

<sup>7</sup> Ghorbani and Abu Talib

<sup>8</sup> Alkhaly and Chandra

<sup>9</sup> Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

ویسوامیترا و همکاران<sup>۱</sup> نیز تحقیقاتی را در زمینه بررسی مقاومت حرارتی بتن سبک تولید شده با سنگدانه‌های پلاستیکی از پرکننده معدنی PET انجام دادند. نتایج کار آنها نشان داد که در دمای ۱۰۰°C، بتن با سنگدانه‌های پلاستیکی شروع به ترک خوردن می‌کند که فقط با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال قابل مشاهده است. در حالی که در بتن مرجع، ترک‌ها در دمای ۲۰۰°C شروع به ظاهر شدن کردند و وجود ترک باعث کاهش قابل توجه خصوصیات مکانیکی بتن شد. در حرارت ۳۰۰°C و ۴۰۰°C، نمونه‌های دارای سنگدانه‌های پلاستیکی به شکل زغالی درآمد و سوراخ‌ها و ترک‌های بیشتری با شکاف‌های بزرگ، به دلیل فرآیند تجزیه PET، بوجود آمد [۲۲].

در این زمینه، قیدی و همکاران<sup>۲</sup>، یک مطالعه تجربی در مورد بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی و دوام بتن پر مقاومت با PET بازیافتی به عنوان جایگزینی جزئی برای سنگدانه‌های ریز، انجام دادند و دریافتند که با استفاده از ۵۰٪ PET، چگالی خشک به زیر ۲۰۰۰ kg/m<sup>3</sup> رسید. بنابراین در دسته بتن سبک قرار می‌گیرد. علاوه بر این، شکست بتن در مقایسه با بتن شاهد از ترد به شکل پذیرتر تغییر کرد. همچنین هدایت حرارتی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت و با استفاده از ۵۰٪ PET، هدایت حرارتی کمتر از ۰/۷۱ W/K شد [۲۳].

کودوا<sup>۳</sup>، تحقیقاتی را در زمینه تأثیر ضایعات بازیافتی سنگدانه‌های پلاستیکی HDPE بر ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی و مکانیکی بتن، انجام داد. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که کارایی بتن تازه با افزایش میزان پلاستیک کاهش یافت و مقاومت فشاری برای بتن معمولی، بیشتر از بتن دارای سنگدانه‌های پلاستیکی HDPE، شد. همچنین جرم آب جذب شده توسط نمونه‌های بتن نیز، با افزایش محتوای پلاستیک، افزایش یافت [۲۴].

کاینثاو و همکاران<sup>۴</sup>، به بررسی بتن اصلاح شده با استفاده از ضایعات پلاستیکی PET به عنوان جایگزینی جزئی برای سنگدانه‌های درشت، پرداختند. نتایج نشان داد که اسلامپ این بتن‌های تازه با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های پلاستیکی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، ترکیب سنگدانه‌های PET در بتن، به کارایی خوب و ساخت سازه‌های بتنی سبک، کمک کرد و راحتی انتقال حرارتی را در سازه بتنی فراهم نمود [۲۵].

علی<sup>۵</sup> نیز در تحقیقی به بررسی ضریب ارتجاعی بتن سبک حاوی PET به عنوان سنگدانه ریز، درشت و فیبر با استفاده از داده‌های تجربی، پرداخت. نتایج حاصله از این تحقیق نشان داد، ضریب ارتجاعی برای ۰/۵٪ الیاف PET، ۸٪ افزایش یافت و زمانی که بتن حاوی ۱/۵٪ الیاف PET باشد، ضریب ارتجاعی ۴۵٪ کاهش یافت. همچنین جایگزینی ریزدانه یا سنگدانه درشت با سنگدانه‌های PET به میزان ۱۰۰-۲٪، باعث کاهش ضریب ارتجاعی در محدوده ۷۹-۱٪ شد [۲۶]. عسکر و همکاران<sup>۶</sup> در ادامه تحقیقات درباره تأثیر سنگدانه‌های PET بر بتن، تحقیقی پیرامون استفاده از PET در بتن، انجام دادند. در نتیجه این تحقیق ظرفیت حمل بار هنگامی که از PET، در مخلوط بتن استفاده گردید، به شکل محسوسی بهبود یافت. به طوری که به‌هنگام افزودن ۰/۱-۵/۲۵٪ PET به مخلوط بتن، ۱۰-۲۰٪ افزایش مشاهده شد. همچنین افزودن ۰/۲۵٪ PET به مخلوط بتن، منجر به افزایش جزئی استحکام خمشی در محدوده ۶-۱۵٪ گردید [۲۷].

داوود و همکاران<sup>۷</sup>، آزمایش‌هایی را برای تأثیر استفاده از ضایعات PET به عنوان جایگزین جزئی ماسه طبیعی بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن انجام دادند. نتیجه این آزمایش‌ها نشان داد جایگزینی شن و ماسه با ذرات ضایعات PET تا زمانی که نسبت جایگزینی کمتر از ۱۵٪ باشد، بر مقادیر مربوط به مقاومت نمونه‌های بتن تأثیر مثبت می‌گذارد [۲۸]. اوچه و همکاران<sup>۸</sup>، تحقیقاتی را پیرامون ترکیب، خواص فیزیکی، خواص مقاومتی و دوام بتن حاوی سنگدانه‌های PET، انجام دادند. در نتیجه

<sup>1</sup> Wiswamitra et al.

<sup>2</sup> Qaidi et al.

<sup>3</sup> Kodua

<sup>4</sup> Kayentao et al.

<sup>5</sup> Ali

<sup>6</sup> Askar et al.

<sup>7</sup> Dawood et al.

<sup>8</sup> Uche et al.

این تحقیقات، مشخص گردید که جذب آب به عنوان معیاری برای دوام بتن با افزودن سنگدانه‌های PET، افزایش یافت [۲۹].

الحديثی و همکاران<sup>۱</sup> نیز رفتار ساختاری تیرهای بتنی خودتراکم سبک تقویت شده با استفاده از پلی‌استایرن منبسط شده<sup>۲</sup> به عنوان سنگدانه درشت و حاوی الیاف PET را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از دانه‌های EPS به همراه سنگدانه درشت و الیاف PET در مخلوط بتن، در کاهش چگالی بتن تأثیر مثبت و معنی‌داری داشت و بیشترین درصد کاهش معادل ۳۸/۴۶٪ بود [۳۰]. در ادامه این تحقیقات بصری و همکاران<sup>۳</sup>، در پژوهشی به بررسی تأثیر پلاستیک PET بر بتن سبک، پرداختند. مطابق نتایج، وزن بتن تولید شده با استفاده از پلاستیک PET، نسبت به وزن بتن حاوی سنگدانه‌های معمولی، کاهش یافت، به گونه‌ای که میانگین وزن نمونه مکعبی در سن ۲۸ روزه، با استفاده از درصد‌های ۴۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ پلاستیک PET، به ترتیب، ۶/۹۷، ۶/۷۷، ۶/۴۱ و ۵/۸۴ کیلوگرم شد. مقاومت فشاری بتن نیز، با استفاده بیشتر از پلاستیک PET، کاهش یافت [۳۱].

ربیز<sup>۴</sup> نیز در تحقیقی به بررسی خواص شیمیایی بتن پلیمری<sup>۵</sup> با کیفیت تولید شده از پلی‌استر غیر اشباع به دست آمده از PET پرداخت. نتایج نشان داد استفاده از PET باز یافتی می‌تواند به کاهش هزینه محصولات PC، صرفه جویی در مصرف انرژی و امکان دفع طولانی مدت ضایعات PET کمک کند [۳۲].

دی اولیویرا و کاسترو-گومز<sup>۶</sup>، در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از الیاف بطری PET باز یافت شده به عنوان ملات تقویت شده با الیاف پرداختند. الیاف با برش مکانیکی ساده از بطری‌ها به دست آمد. بررسی بر روی نمونه‌های ملات سیمان-آهک انجام شد. الیاف در احجام، ۵٪، ۱۰٪، ۱٪ و ۱/۵٪ در مخلوط ملات خشک استفاده شدند. سپس به‌طور خاص، خواص مکانیکی مانند مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و چقرمگی ملات اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که ادغام الیاف PET به‌طور قابل توجهی مقاومت خمشی و چقرمگی ملات را بهبود می‌بخشد. حداکثر حجم الیاف PET برای کارایی مد نظر ۱/۵٪ بود [۳۳].

نیک بین و همکاران<sup>۷</sup> نیز در تکمیل مطالعات محققین دیگر، به مطالعه امکان‌سنجی استفاده از ذرات ضایعات PET به عنوان جایگزین سنگدانه برای بررسی فرسایش اسیدی بتن معمولی سازه‌ای پایدار و سبک وزن، پرداختند. در این تحقیق مقاومت بتن PET معمولی<sup>۸</sup> و بتن PET سبک<sup>۹</sup> در برابر فرسایش اسید سولفوریک، مورد بررسی قرار گرفت. ذرات ضایعات PET با مقادیر ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪، جایگزین سنگدانه‌های طبیعی ریز در هر دو مخلوط NPC و LWPC، شده و سپس در محلول اسید سولفوریک ۵٪ غوطه‌ور گردیدند و بار خرد کردن، اندازه‌گیری جرم و آزمایش سرعت ضربه ماوراء صوت بر روی آنها انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد، نه تنها LWPC کمتر از NPC فرسایش می‌یابد، بلکه کاهش بار خرد کردن، کاهش جرم و سرعت کاهش سرعت ضربه ماوراء صوت آنها کمتر از نمونه‌های NPC بود [۳۴].

فریجیونه<sup>۱۰</sup>، در تحقیقی به بررسی خواص رئولوژی و مکانیکی بتن ساخته شده از سنگدانه‌های PET تولید شده از بطری‌های PET زباله<sup>۱۱</sup> شسته نشده به عنوان جایگزین سنگ دانه‌های ریز (ماسه طبیعی) در بتن، پرداخت. با تجزیه و تحلیل نتایج این تحقیق مشخص شد که بتن‌های WPET کارایی مشابه، مقاومت فشاری و مقاومت کششی کمی کمتر و شکل‌پذیری نسبتاً بالاتری نسبت به بتن مرجع نشان دادند [۳۵].

<sup>1</sup> Al-Hadithi et al.

<sup>2</sup> Expanded Polystyrene (EPS)

<sup>3</sup> Basri et al.

<sup>4</sup> Rebeiz

<sup>5</sup> Polymer Concrete (PC)

<sup>6</sup> de Oliveira and Castro-Gomes

<sup>7</sup> Nikbin et al.

<sup>8</sup> Normal PET Concrete (NPC)

<sup>9</sup> Lightweight PET Concrete (LWPC)

<sup>10</sup> Frigione

<sup>11</sup> Waste PET (WPET)

اسواتاما و همکاران<sup>۱</sup>، با بررسی نتایج تحقیقات پیشین و در جهت تکمیل تحقیقات در این زمینه، به تحقیق در زمینه تاثیر افزودن ضایعات پلاستیکی PET به بتن خود تراکم<sup>۲</sup> از نظر رفتار و خصوصیات مکانیکی در زمانی که بتن تازه است، پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق، اثر افزودن PET بر رفتار بتن تازه بر روی تمام موارد آزمایش نشان داد که با افزایش PET، قابلیت پر کردن و قابلیت روانی و کارایی بتن افزایش می‌یابد. با این حال، افزایش PET باعث کاهش خواص مکانیکی بتن SCC شد. نتایج آزمایش حرارتی نیز نشان داد که خواص مکانیکی بتن (مقاومت فشاری، شکافتگی و ضریب ارتجاعی) پس از گرمایش در دمای ۲۵۰°C تغییر نکرده است، در حالی که در دمای ۶۰۰°C کاهش ظرفیت قابل توجهی داشتند [۳۶]. با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته، PET، جایگزین تنها درصدی از ماسه طبیعی شده بود، هدف این تحقیق بررسی امکان کاربرد PET در نقش جایگزین لیکا در تولید بتن سبک سازه‌ای و تعیین اثرات آن بر خواص مکانیکی این نوع بتن می‌باشد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

#### ۲-۱-۱- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های شن و ماسه حدود ۶۰-۷۵٪ از حجم بتن را تشکیل می‌دهند. از این مقدار ۶۰-۷۰٪ از کل دانه‌ها شن و ۴۰-۳۰٪ دانه‌ها را ماسه تشکیل می‌دهد. سنگدانه‌ها نقش اسکلت بتن را دارند و مقاومت بتن بستگی به مقاومت سنگدانه‌ها دارد. به‌طور مثال پایداری و دوام بتن تا حد زیادی متأثر از این مصالح می‌باشد. شن مصرفی مورد استفاده در این تحقیق، به شن ۳/۴" یا بادامی، که از نظر اندازه اسمی، حداکثر ۱۹ mm، و شن ۳/۸" یا نخودی، که از نظر اندازه اسمی، حداکثر ۹/۵ mm می‌باشند، تقسیم می‌گردند، که از معادن در مسیر سد کرخه، شهرستان اندیمشک در استان خوزستان، تهیه گردیدند. مطابق استاندارد ASTM C-127 آزمایش وزن مخصوص و جذب آب برای شن ۳/۴" و شن ۳/۸" مصرفی تحقیق انجام پذیرفت [37]؛ بر همین اساس وزن مخصوص شن ۳/۴" در حالت اشباع با سطح خشک، ۲/۷۱ gr/cm<sup>3</sup> و وزن مخصوص ظاهری آن ۱/۶۷ gr/cm<sup>3</sup> تعیین گردید و هم‌چنین پس از انجام آزمایش، وزن مخصوص شن ۳/۸" در حالت اشباع با سطح خشک، ۲/۶۹ gr/cm<sup>3</sup> و وزن مخصوص ظاهری ۱/۶۹ gr/cm<sup>3</sup> مشخص شد. هم‌چنین با انجام آزمایش، تعیین گردید که جذب آب شن ۳/۴" ۰/۸۷٪، و جذب آب شن ۳/۸" ۰/۹۴٪ می‌باشد.

#### ۲-۱-۲- سیمان

برای انجام این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ شرکت سیمان کارون به علت راحتی در تهیه و فراگیر بودن دسترسی به آن و هم‌چنین تطابق با شرایط محیطی محل تحقیق به علت ضد سولفات بودن و تاحدودی کندگیر بودن، استفاده گردید. وزن مخصوص این سیمان ۳/۱۳ gr/cm<sup>3</sup> و سطح ویژه آن نیز ۳۰۵۰ cm<sup>2</sup>/gr می‌باشد.

سیمان پرتلند نوع ۲ شرکت سیمان کارون، مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹-ISIRI و استاندارد امریکا ASTM C150 تولید می‌شود و دارای حداکثر به میزان ۸٪ C3A می‌باشد [۳۸، ۳۹]. مقاومت اولیه و نهایی مالت استاندارد آن نسبت به سیمان نوع ۱ کمتر می‌باشد. سیمان نوع ۲ به عنوان سیمان اصلاح‌شده در برابر حمله متوسط سولفات‌ها از سیمان معمولی مقاوم‌تر است و در مواردی که آب‌های زیر زمینی یا خاک حاوی مقدار کمی سولفات باشند مصرف می‌گردد. ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ مصرفی تحقیق، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ مصرفی در تحقیق

گستره (رواداری) محصول	نتیجه (%)	مولفه‌های تعیین کننده آزمایش
۲/۰±۰/۵	۱/۹	(افت حرارتی) LOI
-	۲۱/۰	SiO <sub>2</sub>
-	۴/۶	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

<sup>1</sup> Aswatama et al.

<sup>2</sup> Self-Compacting Concrete (SCC)

مولفه‌های تعیین کننده آزمایش	نتیجه (%)	گستره (رواداری) محصول
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۶	-
CaO	۶۲/۵	-
MgO	۳/۲	Max ۳/۵
SO <sub>3</sub>	۲/۴	۲/۲±۰/۵
A.E (قلیایی معادل)	۰/۷۶	-
IR (باقیمانده نامحلول)	۰/۰۴	-

### ۳-۱-۲- سبکدانه لیکا (۴-۰) mm

با توجه به این موضوع که هدف این تحقیق امکان‌سنجی ساخت بتن سبک سازه‌ای با استفاده از سنگدانه‌های PET و تعیین خواص مکانیکی آن می‌باشد، پس از بررسی‌های مختلف و استفاده از طرح‌های مخلوط متفاوت، برای کاهش وزن بتن و تولید بتن سبک سازه‌ای، همزمان با استفاده از سنگدانه‌های PET، از سنگدانه‌های لیکا<sup>۱</sup> با اندازه (۴-۰) mm به جای ماسه معمولی استفاده شد؛ لیکا مصرفی در این تحقیق به علت جایگزین شدن آن با ماسه طبیعی، جهت تولید بتن سبک، از نوع لیکا با اندازه (۴-۰) mm می‌باشد، که از کارخانه لیکا شهرستان زرننده استان مرکزی تهیه گردید. جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی دانه لیکا را نشان می‌دهد. آزمایشات انجام شده نشان داده است PH این دانه‌ها حدود ۷/۲ است و دانه‌های لیکا از نظر شیمیایی خنثی هستند.

جدول ۲: تجزیه شیمیایی سنگدانه لیکا (%)

SiO <sub>2</sub>	۶۶/۰۵	MgO	۱/۹۹	SiO <sub>3</sub>	۰/۰۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۶/۵۷	TiO <sub>2</sub>	۰/۷۸	Na <sub>2</sub> O	۰/۶۹
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷/۱۰	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۲۱	K <sub>2</sub> O	۲/۶۹
CaO	۲/۴۶	MnO	۰/۰۹	مجموع	۹۸/۶۶

### ۲-۱-۴- سبکدانه PET

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق امکان‌سنجی تولید بتن سبک سازه‌ای حاوی PET و بررسی خواص مکانیکی این بتن تولید شده می‌باشد، که در نهایت یکی از اهداف مهم آن بازیافت در حجم صنعتی PET رهاشده در طبیعت می‌باشد؛ PET مورد استفاده در این تحقیق به صورت بازیافتی و در محدوده دانه‌بندی لیکا (جایگزین ماسه طبیعی) مورد استفاده در این پژوهش، در شهر اهواز و از یکی از مراکز بازیافت PET که به Hot Wash<sup>۲</sup> معروف است، تهیه گردید. دانه‌بندی سبکدانه PET بر اساس حداکثر و حداقل درصد دانه‌های گذشته از الک‌های استاندارد مطابق با ASTM C136 انجام گرفت [۴۰]. در کارخانه‌های بازیافت، PET دقیقاً مثل «سنگدانه سبک مصنوعی» تولید می‌شود؛ یعنی از مرحله تفکیک تا شست‌وشوی داغ، خشک کردن و در نهایت دانه‌بندی در اندازه‌های مختلف. در ادامه مراحل تولید سبکدانه PET توضیح داده شده است.

### ۲-۱-۴-۱- جمع‌آوری، تفکیک و آماده‌سازی اولیه بطری‌های PET

فرآیند تولید سنگدانه‌های PET از مرحله جمع‌آوری بطری‌های ضایعاتی نوشیدنی‌ها آغاز می‌شود. پسماندهای پلاستیکی ابتدا به مرکز بازیافت منتقل شده و روی نوار نقاله‌های صنعتی، جداسازی و آماده‌سازی می‌شوند. در این مرحله، هدف اصلی جداسازی PET خالص از سایر پلاستیک‌ها مانند: HDPE، PP و PVC، فلزات و مواد زائد آلی است. این مرحله عبارت‌است از:

<sup>۱</sup> Light Expanded Clay Aggregate (LECA)

<sup>۲</sup> دیگ Hot Wash یک مخزن آب گرم است که در خط بازیافت PET بسیار کاربرد دارد. این دیگ پس از گرم کردن آب، وظیفه شست‌وشو پرک‌های PET و چربی‌زدایی از پرک‌ها را دارد. در این دیگ سود به آرامی، اضافه می‌گردد که موجب افزایش کیفیت پرک‌ها می‌گردد و پرک‌ها، خالص‌تر، از خط خارج می‌شوند.

## الف- جمع‌آوری و انتقال

بطری‌های مصرف‌شده PET از سیستم‌های مدیریت پسماند شهری، مراکز تفکیک و صنایع نوشیدنی جمع‌آوری و به کارخانه بازیافت منتقل می‌شوند.

ب- جداسازی دستی و اپتیکی در ابتدای خط، اپراتورها به صورت دستی آلودگی‌های درشت، فلزات، کاغذ، شیشه و پلاستیک‌های غیر PET را حذف می‌کنند. سپس دستگاه‌های جداساز نوری<sup>۱</sup> با استفاده از حسگرهای فروسرخ نزدیک<sup>۲</sup> بطری‌های PET را بر اساس نوع پلیمر و گاهی رنگ (شفاف، سبز، آبی) تشخیص داده و از سایر پلاستیک‌ها جدا می‌کنند.

## ج- حذف درپوش‌ها و برچسب‌ها

درپوش‌ها معمولاً از جنس HDPE و PP و برچسب‌ها از جنس PP، PVC یا کاغذ می‌باشند که به کمک واحدهای مکانیکی و در ادامه در زمان خردایش اولیه<sup>۳</sup> و شست‌وشو جدا می‌شوند.

د- خردایش اولیه بطری‌های تفکیک‌شده وارد آسیاب‌های تیغه‌ای شده و به ذرات کوچک با ابعاد حدود (۲۰-۴۰) mm تبدیل می‌شوند تا برای شست‌وشوی داغ آماده شوند. شکل ۱ مرحله تفکیک و خردایش اولیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مرحله تفکیک و خردایش اولیه PET

## ۲-۴-۱-۲- فرآیند شست‌وشوی داغ و جداسازی آلودگی‌ها

برای استفاده از PET به عنوان سنگدانه در بتن، لازم است سطح آن تا حد امکان عاری از آلودگی‌های آلی، چربی، رنگ، چسب و برچسب باشد. این کار در واحد شست‌وشوی داغ انجام می‌شود.

### الف- خوراک‌دهی به واحد شست‌وشوی داغ

ذرات خردشده اولیه PET به یک یا چند مخزن شست‌وشوی داغ از جنس فولاد ضدزنگ خوراک‌دهی می‌شوند.

### ب- دمای شست‌وشو و مواد شیمیایی

دمای شست‌وشو معمولاً در محدوده °C (۸۰-۹۰) تنظیم می‌شود. محلول شست‌وشو شامل آب، سود سوزآور<sup>۱</sup> و مواد شوینده و مرطوب‌کننده صنعتی است تا چربی‌ها، چسب‌ها و آلودگی‌های آلی به خوبی جدا شوند. زمان ماندن PET در این مرحله معمولاً بین ۱۵ تا ۳۰ دقیقه است.

<sup>۱</sup> Optical Sorters

<sup>۲</sup> Near-Infrared Sensors (NIR)

<sup>۳</sup> Pre-shredding

### ج- هم‌زدن مکانیکی و جداسازی آلودگی‌ها

هم‌زدن‌های مکانیکی یا سیستم‌های الکترومکانیکی باعث ایجاد آشفتگی شدید در مخزن شده و موجب جدایش برچسب‌ها، چسب، ذرات کاغذ و مواد آلی می‌شوند. به دلیل اختلاف چگالی، بخشی از ناخالصی‌ها مانند: درپوش‌های از جنس HDPE و PP روی سطح شناور شده و به صورت سرریز جدا می‌شوند، در حالی که ذرات خردشده اولیه PET در فاز مایع معلق می‌مانند.

### د- آبکشی چندمرحله‌ای<sup>۲</sup>

پس از شست‌وشوی داغ، ذرات خردشده اولیه PET از چندین مرحله آبکشی عبور می‌کنند تا باقیمانده مواد قلیایی و شوینده کاملاً حذف شود و pH سطحی آن‌ها به محدوده خنثی (نزدیک به pH=7) برسد؛ این موضوع برای عدم تأثیر منفی روی محیط قلیایی خمیر سیمان اهمیت دارد. شکل ۲ مخزن شست‌وشوی گرم مورد استفاده برای پاک‌سازی پرک‌های PET را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مخزن شست‌وشوی گرم مورد استفاده برای پاک‌سازی پرک‌های PET

### ۲-۴-۱-۳- خشک‌کردن حرارتی و آماده‌سازی برای دانه‌بندی

پس از شست‌وشوی داغ و آبکشی، ذرات خردشده اولیه PET دارای رطوبت سطحی قابل توجهی هستند و باید قبل از دانه‌بندی و استفاده در بتن، خشک شوند.

### الف- آب‌گیری مکانیکی<sup>۳</sup>

ذرات خردشده اولیه PET، ابتدا وارد گریزانه<sup>۴</sup> یا پرس‌های مکانیکی شده و بخش عمده آب آزاد سطحی آن‌ها جدا می‌شود.  
ب- خشک‌کن گریز از مرکز و حرارتی در مرحله بعد، ذرات خردشده اولیه PET، در خشک‌کن‌های گریز از مرکز<sup>۵</sup> و سپس خشک‌کن‌های حرارتی<sup>۶</sup> عبور داده می‌شوند. هوای گرم با دمای کنترل‌شده از میان ذرات خردشده اولیه PET عبور کرده و

<sup>1</sup> Sodium hydroxide (NaOH)

<sup>2</sup> Rinsing

<sup>3</sup> Mechanical Dewatering

<sup>4</sup> Centrifugus

<sup>5</sup> Centrifugal Dryer

<sup>6</sup> Thermal Dryers

رطوبت سطحی آن‌ها را کاهش می‌دهد تا به سطح رطوبت مناسب برای ذخیره‌سازی و دانه‌بندی (اغلب رطوبت کمتر از ۲٪) برسند.

### ج- انتقال به سیلو یا مخازن میانی

ذرات خردشده اولیه PET خشک‌شده، در سیلوهای میانی ذخیره می‌شوند تا به صورت پیوسته به واحد دانه‌بندی (الک‌های لرزان صنعتی) تغذیه شوند. شکل ۳ آب‌گیری مکانیکی و خشک‌کردن حرارتی پرک‌های PET شست‌وشوی گرم‌شده را پیش از طبقه‌بندی اندازه ذرات نشان می‌دهد.



شکل ۳- آب‌گیری مکانیکی و خشک‌کردن حرارتی پرک‌های PET شست‌وشوی گرم‌شده، پیش از طبقه‌بندی اندازه ذرات

### ۴-۱-۲- دانه‌بندی و تفکیک PET به سایزهای مختلف سنگدانه

در مرحله نهایی، ذرات خردشده اولیه PET خشک‌شده، بر اساس اندازه به دسته‌های مختلف سنگدانه (مشابه ماسه و ریزدانه سبک) طبقه‌بندی می‌شوند. این مرحله مشابه آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق استاندارد ASTM C136 اما در مقیاس صنعتی می‌باشد.

#### الف- خوراک‌دهی به الک‌های لرزان<sup>۱</sup>

- ذرات خردشده اولیه PET خشک‌شده، به وسیله نوار نقاله به یک سری الک لرزان چندطبقه وارد می‌شوند.
- هر طبقه الک دارای اندازه چشمه مشخص (مثلاً ۴، ۸، ۱۲ mm و ...) است تا محدوده‌های دانه‌بندی مختلف تولید شود.

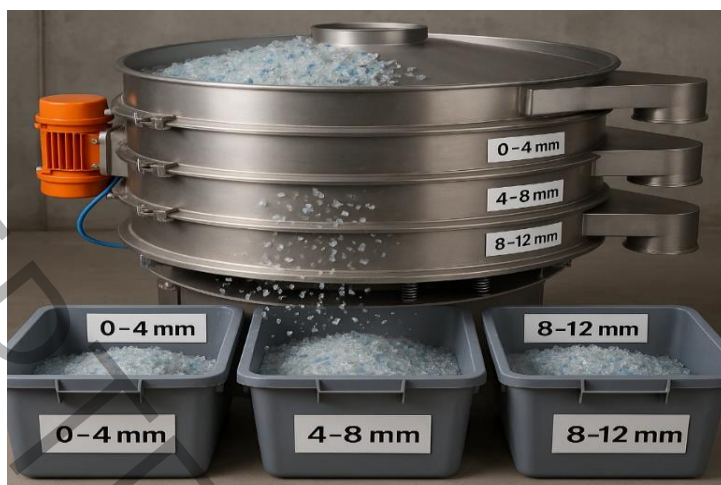
#### ب- تفکیک بر اساس اندازه ذرات

با توجه به ابعاد چشمه‌ها و تنظیمات خط، می‌توان PET را در محدوده‌های دانه‌بندی مختلف برای استفاده به عنوان سنگدانه در بتن طبقه‌بندی کرده؛ محدوده‌های دانه‌بندی معمول عبارت‌اند از:

- ✓ PET در محدوده ۴-۰ mm: ریزدانه (جایگزین ماسه طبیعی یا لیکای ریز دانه)
- ✓ PET در محدوده ۸-۴ mm: میان‌دانه
- ✓ PET در محدوده ۱۲-۸ mm: درشت‌دانه

<sup>1</sup> Vibrating Screens

سبک‌دانه‌ها پس از عبور از الک‌ها در مخازن جداگانه جمع‌آوری شده و برای استفاده در مصارف مختلف از جمله طرح مخلوط بتن برچسب‌گذاری می‌شوند. شکل ۴ تفکیک و دانه‌بندی PET خشک‌شده در واحد الک لرزان صنعتی برای جداسازی محدوده‌های مختلف دانه‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تفکیک و دانه‌بندی PET خشک‌شده در واحد الک لرزان صنعتی برای جداسازی محدوده‌های مختلف دانه‌بندی

#### ۵-۴-۱-۲- ویژگی‌های محصول نهایی

خروجی این فرآیند، سنگدانه‌های PET با سطحی تمیز و بدون چربی، رنگ‌زدایی‌شده و با چگالی ظاهری در حدود  $gr/cm^3$  (۱/۳-۱/۴) است. بسته به نوع دانه‌بندی، این مواد می‌توانند به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌های طبیعی یا لیکا در طرح‌های بتن سبک استفاده شوند. از آنجا که سطح PET پس از فرآیند شست‌وشوی داغ، کاملاً تمیز و زبر می‌شود، چسبندگی بین خمیر سیمان و پلاستیک (ناحیه ITZ) نسبت به PET خام به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا می‌کند.

#### ۵-۴-۱-۲- آب

از آنجایی که آب بتن، آبی است، که برای آشامیدن مناسب باشد و مزه و بوی خاصی نداشته باشد، آب لازم برای ساخت بتن تحقیق از آب آشامیدنی شهر اهواز تهیه گردید. در این پژوهش منظور از «آب آشامیدنی اهواز» آب لوله‌کشی شهری تأمین‌شده از شبکه رسمی شرکت آب و فاضلاب اهواز بوده است و آب مورد استفاده، همان آب شرب متداول شهر است. هرچند در این پروژه آنالیز شیمیایی اختصاصی آب انجام نشد، اما براساس مطالعات انجام‌شده روی آب شرب اهواز، کیفیت فیزیکی و شیمیایی این آب توسط سواری و همکاران<sup>۱</sup> ارزیابی شده است؛ طبق این مطالعه، میانگین مقادیر  $pH$ ،  $TDS^3$  و سختی آب به ترتیب حدود ۷/۳، ۱۰۰۰  $mg/L$  و ۱۰۹ گزارش شده و شاخص پایداری رایزنر<sup>۴</sup> برابر ۸/۴۳ بوده که نشان‌دهنده آب نسبتاً خورنده ولی در محدوده قابل قبول برای آب شرب در استانداردهای ملی است. مطالعه سواری و همکاران، ۴۵۶ نمونه از ۷۶ نقطه در شبکه توزیع آب آشامیدنی شهر اهواز را بررسی کرد که نتایج آن در جدول ۳ قرار داده شده است [۴۱].

جدول ۳: تجزیه و تحلیل فیزیکی-شیمیایی آب آشامیدنی شهر اهواز

توضیح	واحد	مقدار متوسط	پارامتر
در زمان نمونه‌برداری	$^{\circ}C$	۱۹	دما

<sup>1</sup> Savari et al.

<sup>2</sup> Potential of Hydrogen (pH)

<sup>3</sup> Total Dissolved Solids (TDS)

<sup>4</sup> Ryznar Stability Index (RSI)

توضیح	واحد	مقدار متوسط	پارامتر
در حد قابل قبول برای آب شرب	NTU	۱/۹۷	شفافیت (Turbidity)
نزدیک خنثی، کمی قلیایی	-	۷/۳۱	pH
برای محاسبه شاخص خوردگی	-	۷/۸۸	pHs (pH اشباع)
نسبتاً بالا	$\mu\text{S/cm}$	۱۶۷۸	هدایت EC (الکتریکی)
بیشتر از حد توصیه (۵۰۰) WHO، ولی در ایران رایج است	mg/L	۱۰۰۶	کل TDS (جامدات محلول)
قلیائیت متوسط	به صورت mg/L $\text{CaCO}_3$	۱۲۹	قلیائیت کل
سختی نسبتاً زیاد	mg/L	۱۰۹	کلسیم ( $\text{Ca}^{2+}$ )
قابل قبول	mg/L	۶/۷۸	اکسیژن DO (محلول)
زیر حد حداکثر مجاز ایران (معمولاً ۶۰۰-)	mg/L	۲۹۳	کلراید (Cl)
زیر حد مجاز ایران (حدود ۴۰۰-۵۰۰)	mg/L	۲۶۴	سولفات ( $\text{SO}_4^{2-}$ )
نشان‌دهنده خاصیت خوردگی آب	-	۸/۴۳	شاخص پایداری (Ryznar)

در تحقیقی دیگر، بر اساس مطالعه الباجی و همکاران<sup>۱</sup> و در تکمیل تحقیقات گذشته در این زمینه، کیفیت آب لوله‌کشی شهر اهواز از نظر برخی فلزات سنگین شامل سرب<sup>۲</sup>، کادمیم<sup>۳</sup> و جیوه<sup>۴</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که غلظت میانگین سرب در آب شرب اهواز برابر با ۰/۰۲ mg/L است که در برخی نمونه‌ها بالاتر از حد توصیه‌شده سازمان جهانی بهداشت برای آب آشامیدنی (بالاتر از حد WHO یعنی ۰/۰۱ mg/L) می‌باشد. همچنین غلظت کادمیم برابر ۰/۰۰۱۲ mg/L (زیر حد WHO)، و غلظت جیوه برابر ۰/۰۰۴۷ mg/L، اندازه‌گیری شده که اگرچه مقادیر Cd در محدوده قابل قبول استانداردها قرار دارد، اما بخش قابل توجهی از نمونه‌ها از نظر Hg به مقدار نزدیک یا بالاتر از حد مجاز ملی ایران (۰/۰۰۶ mg/L) رسیده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که آب شرب اهواز، علیرغم آنکه در اغلب پارامترهای فیزیکی و شیمیایی قابل استفاده تلقی می‌شود، ممکن است در برخی شرایط از نظر فلزات سنگین رفتار نسبتاً حساس‌تری داشته باشد. [۴۲]. با توجه به اینکه مطابق استاندارد ASTM C1602، آب مناسب برای شرب به‌طور کلی برای ساخت بتن نیز قابل قبول تلقی می‌شود، استفاده از آب لوله‌کشی اهواز در این پژوهش، از نظر استانداردهای بتن توجیه‌پذیر است [۴۳]. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از آب لوله‌کشی شهری اهواز استفاده شده، استناد به داده‌های تحقیق سواری و همکاران و همچنین پژوهش الباجی و همکاران می‌تواند در تفسیر کیفیت آب مصرفی و میزان سازگاری آن با استانداردهای آب مناسب برای ساخت بتن (ASTM C1602) مؤثر باشد.

<sup>1</sup> Albaji et al.

<sup>2</sup> Lead (Pb)

<sup>3</sup> Cadmium (Cd)

<sup>4</sup> Mercury (Hg)

## ۲-۲- طرح مخلوط‌ها

بدین سبب که هدف از انجام تحقیق، تولید بتن سبک سازه‌ای حاوی PET بود، برای رسیدن به طرح مخلوط مرجع بتن سبک سازه‌ای، بعد از مطالعه پژوهش‌های گذشته در زمینه این نوع بتن‌ها، برای تامین شرایط سبک بودن و سازه‌ای بودن بتن تولید شده، لیکا (۴-۰) mm، به میزان ۱۰۰٪ جایگزین ماسه طبیعی گردید. برای رسیدن به طرح مخلوط مرجع، ابتدا چهار طرح مخلوط اولیه و بر اساس اندازه‌های وزنی مطابق استاندارد ACI 211.1-91 تهیه گردید [۴۴]. نمونه‌هایی مطابق چهار طرح مخلوط اولیه تولید شد تا از لحاظ شکل ظاهری، اسلامپ و مقاومت ۷ و ۲۸ روزه، مناسب‌ترین طرح مخلوط از لحاظ تامین خواسته‌های مورد نیاز تحقیق، به‌عنوان طرح مخلوط مرجع تعیین گردد. سیمان و سنگدانه درشت تمامی طرح‌های مخلوط اولیه، درصدهای وزنی مشابه و یکسانی داشتند به گونه‌ای که مقدار وزنی سیمان تمام طرح‌های مخلوط برابر با ۳۵۰ کیلوگرم، و مقدار وزنی سنگدانه درشت آنها نیز برابر با ۸۰۰ کیلوگرم شن ۳/۴" و ۴۰۰ کیلوگرم شن ۳/۸" بود ولی مقدار آب و سنگدانه ریز (لیکا) (۴-۰) mm آنها از نظر وزنی متغیر بود، به‌گونه‌ای که اولین طرح مخلوط اولیه، با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و مقدار  $600 \text{ kg/m}^3$  لیکا (۴-۰) mm و ۱۴۷ کیلوگرم آب، و طرح مخلوط دوم نیز با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و مقدار  $600 \text{ kg/m}^3$  لیکا (۴-۰) mm و ۱۴۷ کیلوگرم آب، و طرح مخلوط سوم با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و مقدار  $600 \text{ kg/m}^3$  لیکا (۴-۰) mm و ۱۲۲/۵ کیلوگرم آب، و طرح مخلوط چهارم نیز با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و مقدار  $600 \text{ kg/m}^3$  لیکا (۴-۰) mm و ۱۲۲/۵ کیلوگرم آب می‌باشد. در جدول ۴ جزئیات طرح‌های مخلوط اولیه برای رسیدن به طرح مخلوط مرجع ارائه گردیده است. در نام‌گذاری طرح‌های مخلوط اولیه، SH نام طرح مخلوط اولیه و اعداد مقابل آن شماره طرح می‌باشند.

جدول ۴: جزئیات طرح مخلوط‌های اولیه

کد طرح	مقدار مصالح ( $\text{kg/m}^3$ )			
	مقدار سیمان	آب	شن ۳/۴"	شن ۳/۸"
SH1	۳۵۰	۱۴۷	۸۰۰	۴۰۰
SH2	۳۵۰	۱۴۷	۸۰۰	۴۰۰
SH3	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰
SH4	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰

پس از تهیه نمونه‌ها از طرح مخلوط‌های اولیه، و انجام آزمایش‌ها برای بررسی خواص مکانیکی آنها، طرح مخلوط با کد SH4، مناسب‌ترین طرح به‌جهت تامین نیازهای تحقیق مشخص گردیده و به‌عنوان طرح مخلوط مرجع انتخاب شد. با بررسی تحقیق‌های گذشته مشخص گردید که هرچه نسبت جایگزینی PET در تحقیقات افزایش یابد، خواص مکانیکی، کاهش می‌یابند؛ اما با توجه به اینکه برای نخستین بار در تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، در این تحقیق لیکا (۴-۰) mm به‌طور کامل جایگزین ماسه گردید و PET موجود در تحقیق جایگزین درصدی از لیکا (۴-۰) mm شد؛ برای بررسی خواص مکانیکی بتن تولید شده به‌این‌شکل و برای مقایسه و صحت‌سنجی با تحقیق‌های گذشته که در آنها درصد بهینه مصرف PET برای افزایش خواص مکانیکی بتن تولید شده، در محدوده ۱۰٪-۱۵٪ بود، PET با مقدار درصدهای ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪، برای جایگزینی با لیکا (۴-۰) mm انتخاب گردید و نتایج حاصل از شکست نمونه‌ها در دوره ۷ و ۲۸ روزه در قالب سه طرح P10، P20 و P30 مورد بررسی قرار گرفت. خاطر نشان می‌گردد که نام‌گذاری طرح‌های مخلوط ذکر شده به‌این‌گونه است که SH بیانگر نمونه‌های مرجع در طرح مخلوط مرجع و عدد بعد از آن نشان دهنده شماره آن در میان طرح‌های مخلوط اولیه است و هم‌چنین در این نام‌گذاری‌ها P بیانگر نمونه‌های حاوی PET و عدد بعد از آن بیانگر درصد PET موجود در نمونه‌های حاوی PET می‌باشد. در جدول ۵ جزئیات طرح‌های مخلوط نهایی برای یک متر مکعب بتن ارائه گردیده است.

جدول ۵: جزئیات طرح مخلوط‌های نهایی

کد طرح	نسبت جایگزینی (%)	مقدار مصالح (kg/m <sup>3</sup> )				
		PET	مقدار سیمان	آب	شن ۳/۴"	شن ۳/۸"
(SH)4	۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	مسه لیکا (۴-۰) mm
P10	۱۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰
P20	۲۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۱۶۰
P30	۳۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۱۴۰

### ۲-۳- تولید نمونه‌های بتنی، نحوه اختلاط، نمونه‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای تولید و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه، مطابق با استانداردهای ASTM-C192/C192M-07 و ACI-304R-00 عمل گردید [۴۵، ۴۶]. بعد از آماده نمودن مصالح برای اضافه کردن به مخلوط‌کن؛ ابتدا به منظور جلوگیری نمودن از دست دادن رطوبت استاندارد سنگدانه‌ها، دیواره داخلی مخلوط‌کن به میزانی که رطوبت اضافی به سنگدانه‌ها اضافه نکند، مرطوب گردید. سپس در مرحله اول کل مقدار شن به علاوه یک دوم مقدار سیمان به علاوه یک دوم آب مصرفی در بتن را درون مخلوط‌کن قرار داده و اجازه می‌دهیم به مدت سه دقیقه با سرعت ۳۰ rpm<sup>۱</sup> مواد را با یکدیگر مخلوط نماید. در مرحله دوم کل مقدار لیکا (۴-۰) mm و PET مصرفی تحقیق به علاوه یک دوم باقیمانده سیمان به علاوه یک چهارم آب را به مواد درون مخلوط‌کن اضافه نموده و اجازه می‌دهیم مخلوط‌کن به مدت چهار دقیقه دیگر مواد را با یکدیگر مخلوط نماید. در مرحله سوم یک چهارم آب باقی مانده را به مواد درون مخلوط‌کن اضافه می‌نماییم و اجازه می‌دهیم مخلوط‌کن به مدت سه دقیقه دیگر، مواد را با یکدیگر مخلوط نماید. حال بتن به دست آمده، آماده استفاده می‌باشد.

پس از آماده شدن بتن به روشی که ذکر شد؛ حال برای انجام آزمایش‌های مربوطه براساس استاندارد، اقدام به نمونه‌گیری می‌نماییم. به این منظور ابتدا قالب‌های نمونه‌گیری را آماده می‌نماییم. قالب نمونه‌گیری باید تمیز و عاری از هرگونه بتن و مواد سیمانی باشد. سپس به منظور راحتی در جداسازی نمونه‌ها از قالب، بعد از سخت شدن بتن؛ به صورت یک لایه بسیار نازک تمامی سطوح داخلی قالب‌ها را به وسیله روغن قالب پوشانده و روغن اضافی را از داخل قالب‌ها تخلیه می‌نماییم. باید به این نکته توجه نمود که استفاده از روغن سوخته و سایر مواد نفتی به جای روغن قالب مجاز نمی‌باشد. سپس بتن در سه لایه درون قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی از پیش آماده شده ریخته شد و توسط یک میله‌ی گرد به قطر ۱۶ mm که به کوبه معروف است، به هر لایه ۲۵ ضربه زده می‌شود (شکل ۵). پس از اتمام ریختن هر لایه بتن و ضربه زدن به آن به وسیله کوبه، برای رسیدن به تراکم مورد نظر، با استفاده از چکش لاستیکی به دیواره‌های قالب ضربه زده شده و به مدت چند ثانیه بر روی میز لرزاننده قرار گرفتند. پس از ریختن لایه‌ی آخر بتن و انجام مراحل ذکر شده، سطح بالای نمونه توسط ماله و یا یک خط‌کش فلزی صاف، پرداخت شده و به محیط مناسب جهت نگهداری منتقل شدند. سپس با استفاده از پوشش‌های مرطوب به گونه‌ای که رطوبت نسبی کمتر از ۹۰٪ نباشد، به مدت ۲۴±۲ ساعت به صورت ذکر شده قرار گرفتند و پس از گذشت زمان مورد نظر از قالب‌ها خارج شده و تا روز آزمایش، به حوضچه عمل‌آوری منتقل شدند. لازم به ذکر است که دمای حوضچه عمل‌آوری نمونه‌ها در طول مدت عمل‌آوری، ۲۰±۲°C بود (شکل ۵). در جدول ۶ مشخصات نمونه‌های بتنی تولید شده، ارائه شده است.

جدول ۶: مشخصات نمونه‌های بتنی تولید شده

آزمایش	تعداد طرح	نوع نمونه و ابعاد (cm)	سن نمونه (روز)	تعداد نمونه	محیط عمل‌آوری
مقاومت فشاری	۷	مکعبی به استاندارد	۷	۲	غرقاب
			۲۸	۳	غرقاب
ضریب ارتجاعی استاتیکی	۴	استوانه‌ای استاندارد	۲۸	۳	غرقاب

<sup>1</sup> Revolution per minute (rpm)



ب: اختلاط مصالح تحقیق



الف: مصالح مصرفی تحقیق



ث: انجام آزمایش اسلایپ



ت: بتن تولید شده



ح: نمونه‌های قالب‌گیری شده



ج: قالب‌گیری و تهیه نمونه‌های تحقیق



د: کنترل دمای محیط عمل‌آوری



خ: عمل‌آوری نمونه‌ها

شکل ۵- مراحل ساخت، نمونه‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها

### ۳- آزمایش‌ها و نتایج

#### ۳-۱- آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها

آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲ و استانداردهای ASTM-C136 و ASTM-D 422 انجام پذیرفت [۴۷]. در جداول ۷ تا ۱۰ به ترتیب دانه‌بندی مربوط به لیکا (۰-۴) mm، شن ۳/۴"، شن ۳/۸" و PET مصرفی تحقیق، ارائه گردیده است.

جدول ۷: دانه‌بندی لیکا (۰-۴) mm، مصرفی در تحقیق

وزن عبور کرده (%)	وزن باقی‌مانده (%)		اندازه استاندارد / شماره الک	سوراخ‌های الک	
	تجمعی	جزئی		میلی‌متر	اینچ
۱۰۰	۰	۰	۳/۸"	۹/۵۱	۰/۳۷
۹۵/۹۰	۴/۱۰	۴/۱۰	نمره ۴	۴/۷۵	۰/۱۹
				ریزدانه	
۷۸/۹۰	۲۱/۱۰	۱۷/۰۰	نمره ۸	۲/۳۶	۰/۰۹
۵۲/۲۶	۴۷/۷۴	۲۹/۶۴	نمره ۱۶	۱/۲۰	۰/۰۴
۳۱/۰۶	۶۸/۹۴	۲۱/۲۰	نمره ۳۰	۰/۶۰	۰/۰۲
۱۷/۲۶	۸۲/۷۴	۱۳/۸۰	نمره ۵۰	۰/۳۰	۰/۰۱
۸/۸۶	۹۱/۱۴	۸/۴۰	نمره ۱۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰۶
۲/۵۹	۹۷/۴۱	۶/۲۷	نمره ۲۰۰	۰/۰۷۵	۰/۰۰۳
۲/۵۹				نرمی	

جدول ۸: دانه‌بندی شن ۳/۴"، مصرفی در تحقیق

وزن عبور کرده (%)	وزن باقی‌مانده (%)		اندازه استاندارد / شماره الک	سوراخ‌های الک	
	تجمعی	جزئی		میلی‌متر	اینچ
۱۰۰	۰	۰	۱"	۲۵/۴۰	۱/۰۰
۹۳/۱	۶/۹۰	۶/۹۰	۳/۴"	۱۹/۰۰	۰/۷۵
۶۵/۰۰	۳۵/۰۰	۲۸/۱۰	۱/۲"	۱۲/۷۰	۰/۵۰
۲۴/۳۸	۷۵/۶۲	۴۰/۶۲	۳/۸"	۹/۵۱	۰/۳۷
۴/۱۰	۹۵/۹۰	۲۰/۲۸	نمره ۴	۴/۷۵	۰/۱۹
				ریزدانه	
۲/۷۲	۹۷/۲۸	۱/۳۸	نمره ۸	۲/۳۶	۰/۰۹

جدول ۹: دانه‌بندی شن ۳/۸"، مصرفی در تحقیق

وزن عبور کرده (%)	وزن باقی‌مانده (%)		اندازه استاندارد / شماره الک	سوراخ‌های الک	
	تجمعی	جزئی		میلی‌متر	اینچ
۱۰۰	۰	۰	۳/۴"	۱۹/۰۰	۰/۷۵
۹۴/۰۹	۵/۹۱	۵/۹۱	۱/۲"	۱۲/۷۰	۰/۵۰
۵۶/۳۶	۴۳/۶۴	۳۷/۷۳	۳/۸"	۹/۵۱	۰/۳۷
۷/۷۷	۹۲/۲۳	۴۸/۵۹	نمره ۴	۴/۷۵	۰/۱۹
				ریزدانه	
۳/۵۴	۹۶/۴۶	۴/۲۳	نمره ۸	۲/۳۶	۰/۰۹
۱/۲۵	۹۸/۷۴	۲/۲۹	نمره ۱۶	۱/۲۰	۰/۰۴
۰	۱۰۰	۱/۲۵	نمره ۲۰۰	۰/۰۷۵	۰/۰۰۳

جدول ۱۰: دانه بندی PET، مصرفی در تحقیق

وزن عبور کرده (%)	وزن باقی مانده (%)		اندازه استاندارد / شماره الک	سوراخ های الک	
	تجمعی	جزئی		میلی متر	اینچ
۱۰۰	۰	۰	۳/۸"	۹/۵۱	۰/۳۷
۹۷/۸۲	۲/۱۸	۲/۱۸	نمره ۴	۴/۷۵	۰/۱۹
				ریزدانه	
۹۳/۹۲	۶/۰۸	۳/۹۰	نمره ۸	۲/۳۶	۰/۰۹
۷۵/۵۳	۲۴/۴۷	۱۸/۳۹	نمره ۱۶	۱/۲۰	۰/۰۴
۳۵/۴۸	۶۴/۵۲	۴۰/۰۵	نمره ۳۰	۰/۶۰	۰/۰۲
۱۱/۵۸	۸۸/۴۲	۲۳/۹۰	نمره ۵۰	۰/۳۰	۰/۰۱
۲/۵۱	۹۷/۴۹	۹/۰۷	نمره ۱۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰۶
۰/۴۲	۹۹/۵۸	۲/۰۹	نمره ۲۰۰	۰/۰۷۵	۰/۰۰۳
۰/۴۲				نرمی	

### ۳-۲-۲- آزمایش های بتن تازه

#### ۳-۲-۱- آزمایش اسلامپ

اولین کنترلی که بر روی نمونه بتن انجام می شود، کنترل مقدار اسلامپ بتن است. آزمایش اسلامپ در این تحقیق مطابق الزامات نشریه ۵۵، مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی انجام پذیرفت و الزامات نشریه ۵۵ را تامین نمود [۴۸]؛ که نتایج آن در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱: نتایج آزمایش اسلامپ بتن تازه طرح های تحقیق

کد طرح	(SH)1	(SH)2	(SH)3	(SH)4	P10	P20	P30
اسلامپ (cm)	۶/۲	۶/۴	۵/۵	۵/۸	۵/۴	۵/۲	۵/۰

### ۳-۲-۲- آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه

در این تحقیق، آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه، برای اندازه گیری وزن مخصوص، بر اساس استاندارد ۳۸۲۱ ایران مطابق با ASTM C138 (تعیین چگالی، بازدهی و مقدار هوای بتن به روش وزنی) انجام گرفت [۴۹، ۵۰]. نتایج این آزمایش در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۲: نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح های تحقیق

کد طرح	(SH)1	(SH)2	(SH)3	(SH)4	P10	P20	P30
وزن مخصوص بتن تازه (kg/m <sup>3</sup> )	۱۶۹۴	۱۸۰۸	۱۶۷۶	۱۸۷۶	۱۸۵۰	۱۸۶۵	۱۸۷۵

### ۳-۳- آزمایش های بتن سخت شده

#### ۳-۳-۱- آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت شده

پس از آنکه نمونه های بتنی تهیه شده مطابق طرح مخلوطها به مدت ۲۸ روز درون آب استخر مخصوص، عمل آوری شدند؛ آزمایش تعیین وزن مخصوص نمونه های بتنی سخت شده؛ مطابق استاندارد ۱۵۴۲۷ ایران، انجام پذیرفت [۵۱]. هدف از انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص، درصد جذب و درصد حفرات در بتن سخت شده است. این آزمایش در توسعه داده های مورد نیاز جهت تبدیل جرم و حجم در بتن مناسب و مفید است. و همچنین برای مشخص کردن تطابق بین ویژگی های بتن و نشان دادن تفاوت بین قسمت های مختلف بتن از نظر وزن آن کاربرد دارد. در این آزمایش جذب آب حجمی بتن در حالت اشباع

شده به دست می‌آید و مستقل از نسبت حجم به سطح است. با توجه به انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت‌شده مطابق استاندارد ۱۵۴۲۷ ایران، نتایج به‌دست‌آمده برای این تحقیق، در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۱۳: نتایج آزمایش وزن مخصوص سخت‌شده طرح‌های تحقیق

کد طرح	(SH)1	(SH)2	(SH)3	(SH)4	P10	P20	P30
وزن مخصوص بتن سخت‌شده ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۶۷۳	۱۷۸۹	۱۶۵۶	۱۸۵۵	۱۸۳۰	۱۸۴۲	۱۸۵۴

### ۳-۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری این تحقیق براساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۰۸-۳ (ISIRI 1608-3) و شماره ۵۸۱ انجام پذیرفت [۵۲]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی  $15\text{cm}$  تهیه شدند و تا سنین ۷ و ۲۸ روزه در آب عمل‌آوری گردیدند. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، به‌وسیله دستگاه جک فشاری بتن شکن، تحت آزمایش تنش فشاری قرار گرفتند، تا زمانی که اولین ترک در نمونه اتفاق افتاد، نحوه تهیه گزارش آزمون مقاومت فشاری به این‌گونه می‌باشد که حداکثر نیروی وارده بر سطح مینا یا سطح واقعی تقسیم می‌شود تا مقاومت فشاری آزمون به دست آید. نتیجه مقاومت با دقت  $5\text{ kg/cm}^2$  گزارش شد. مقدار تنش لحظه شکست، مقاومت فشاری است. نتایج آزمون مقاومت فشاری، برای آزمون‌های مکعبی استاندارد بود که بر اساس ضرایب تبدیل مقاومت آزمون‌های مکعبی به استوانه‌ای، نتایج آزمون مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی به آزمون‌های استوانه‌ای تبدیل گردید. در شکل ۶ آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.



شکل ۶- آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری در جدول ۱۴ نشان داده شده است. دمای عمل‌آوری آزمون‌ها برابر  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  بود همچنین تلاش گردید آب حوضچه‌های عمل‌آوری تمیز و عاری از هرگونه مواد مضر باشد.

جدول ۱۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و تبدیل شده به نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بتنی

کد طرح	مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به بعد $15\text{ cm}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )		مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (تبدیل شده با استفاده از ضرایب تبدیل مقاومت نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای)	
	سن نمونه (روز)	سن نمونه (روز)	سن نمونه (روز)	سن نمونه (روز)
(SH)1	۷	۲۸	۷	۲۸
	۱۰۶	۱۵۳	۸۵	۱۲۲
(SH)2	۷	۲۸	۷	۲۸
	۱۵۳	۲۱۸	۱۲۳	۱۷۵

مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (kg/cm <sup>2</sup> ) (تبدیل شده با استفاده از ضرایب تبدیل مقاومت نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای) سن نمونه (روز)		مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ cm (kg/cm <sup>2</sup> ) سن نمونه (روز)		کد طرح
۲۸	۷	۲۸	۷	
۱۳۳	۹۲	۱۶۴	۱۱۵	(SH)3
۱۸۵	۱۲۹	۲۳۰	۱۶۱	(SH)4
۲۱۹	۱۴۲	۲۷۴	۱۷۷	P10
۱۴۸	۹۸	۱۸۵	۱۲۳	P20
۱۲۲	۸۰	۱۵۲	۱۰۰	P30

### ۳-۳-۳- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن

این آزمایش مطابق استاندارد شماره ۵۲۵ استاندارد ملی ایران و بر اساس استاندارد ASTM C 469 انجام پذیرفت [۵۳، ۵۴]. هدف از انجام آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن، تعیین ضریب ارتجاعی بتن تحت تنش فشاری طولی است. آزمون‌ها طبق استانداردهای شماره ۵۸۱ و ۳۲۰۵ استاندارد ملی ایران قالب‌گیری شده و تا زمان آزمون تحت شرایط عمل‌آوری یادشده، نگهداری شدند [۵۵، ۵۶]. آزمون‌ها ظرف مدت یک ساعت بعد از خارج کردن از محیط عمل‌آوری یا مخزن نگهداری، آزمون شدند و تا زمان آزمون، با یک پارچه مرطوب پوشانده شدند. سطوح انتهایی آزمون‌ها با دقت  $\pm 0/5$  درجه عمود بر محور بوده و با دقت  $0/5$  mm مسطح شدند؛ به‌این‌منظور، به علت اینکه سطوح آزمون‌های قالب‌گیری شده صاف و تراز نبودند، طبق استاندارد ASTM C 617 سطح آنها از طریق پوشش شده و یا به اصطلاح کلاهک‌گذاری<sup>۱</sup> شدند [۵۷].



شکل ۷- آماده‌سازی آزمون‌ها برای انجام آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن



شکل ۸- روند انجام آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن

<sup>1</sup> Capping

نتایج حاصل از انجام آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی تحقیق، در جدول ۱۵ ارائه گردیده است.

جدول ۱۵: نتایج حاصل از انجام آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

سن نمونه (روز)	کد طرح	(SH)۴	P10	P20	P30
۲۸	ضریب ارتجاعی (GPa)	۱۶/۵	۱۷/۵	۱۴	۱۲/۹

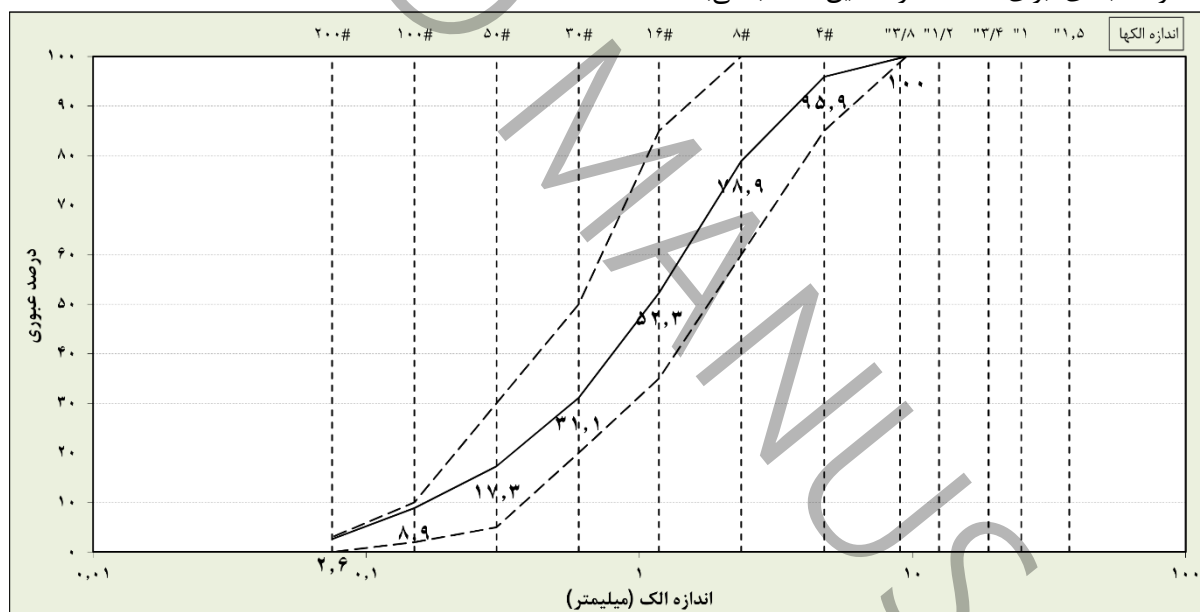
#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

##### ۴-۱- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها

نتایج حاصل از آزمایش‌های دانه‌بندی لیکا (۴-۰) mm، شن ۳/۴"، شن ۳/۸" و PET مصرفی در تحقیق به ترتیب در جدول‌های ۶ تا ۹ نشان داده شد. برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر نتایج حاصل از آزمایش‌های دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی در تحقیق، در فصل چهارم، این نتایج به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۲ ارائه گردید.

##### ۴-۱-۱- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی لیکا (۴-۰) mm

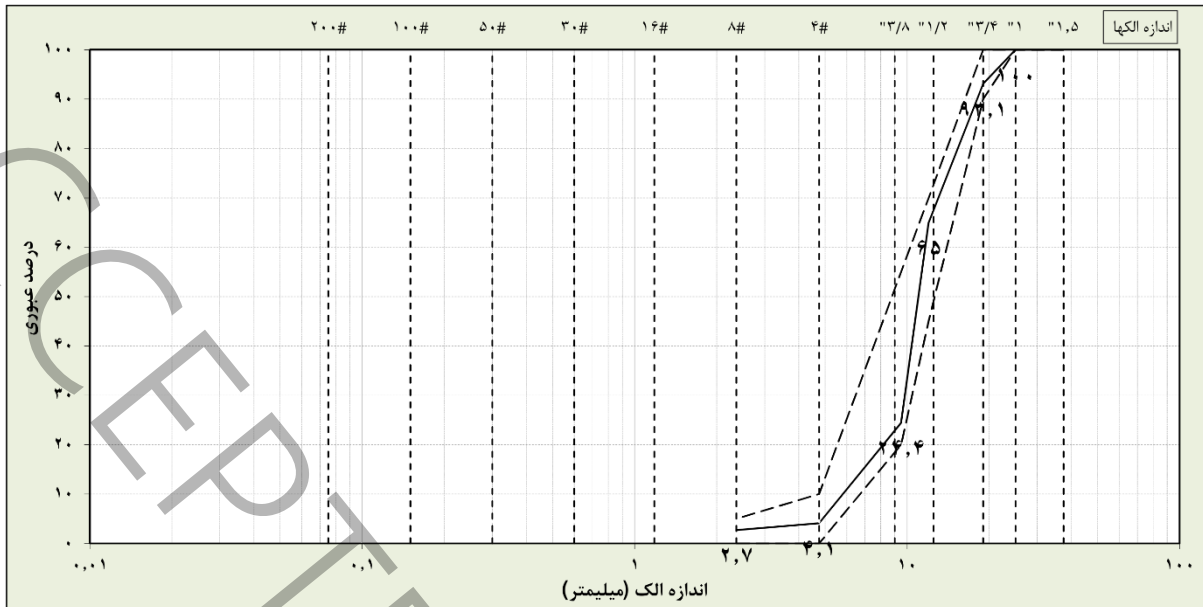
پس از تهیه سنگدانه لیکا (۴-۰) mm مورد استفاده در تحقیق، بر روی نمونه‌ای از آن آزمایش دانه‌بندی انجام شد و نتایج آن در جدول ۶ بیان گردید. نتایج به صورت منحنی در شکل ۹ نشان داد که درصدهای عبوری از هر الک در محدوده تعیین شده بر اساس استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲ و استانداردهای ASTM-D 422 و ASTM-C136 می‌باشد و بر این اساس از نظر دانه‌بندی، برای استفاده در تحقیق مناسب می‌باشد.



شکل ۹- منحنی دانه‌بندی لیکا (۴-۰) mm، مصرفی در تحقیق

##### ۴-۱-۲- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی شن ۳/۴"

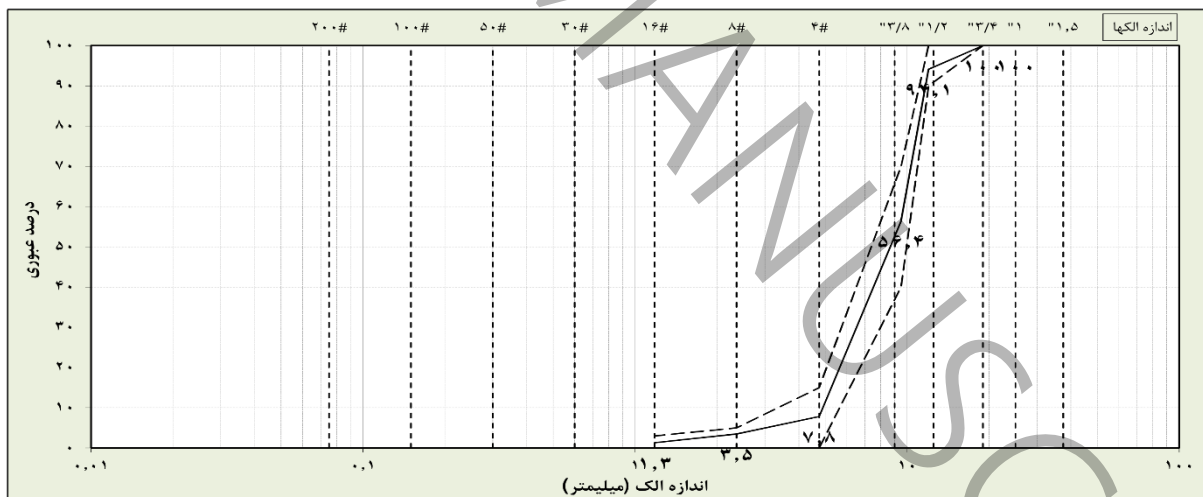
در ادامه انجام آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها، نمونه‌ای نیز از شن ۳/۴" مصرفی در تحقیق تهیه گردید و آزمایش بر روی آن انجام پذیرفت؛ نتایج این آزمایش در جدول ۷ بیان شد. این نتایج در منحنی شکل ۱۰ نشان داد که درصدهای عبوری از هر الک، در محدوده‌ای بود که در استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲ و استانداردهای ASTM-D 422 و ASTM-C136، تعیین شده است و مشخص گردید که شن ۳/۴" تهیه شده برای انجام تحقیق، از نظر دانه‌بندی مطابق استاندارد و مناسب می‌باشد.



شکل ۱۰- منحنی دانه‌بندی شن ۳/۴" مصرفی در تحقیق

#### ۳-۱-۴- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی شن ۳/۸"

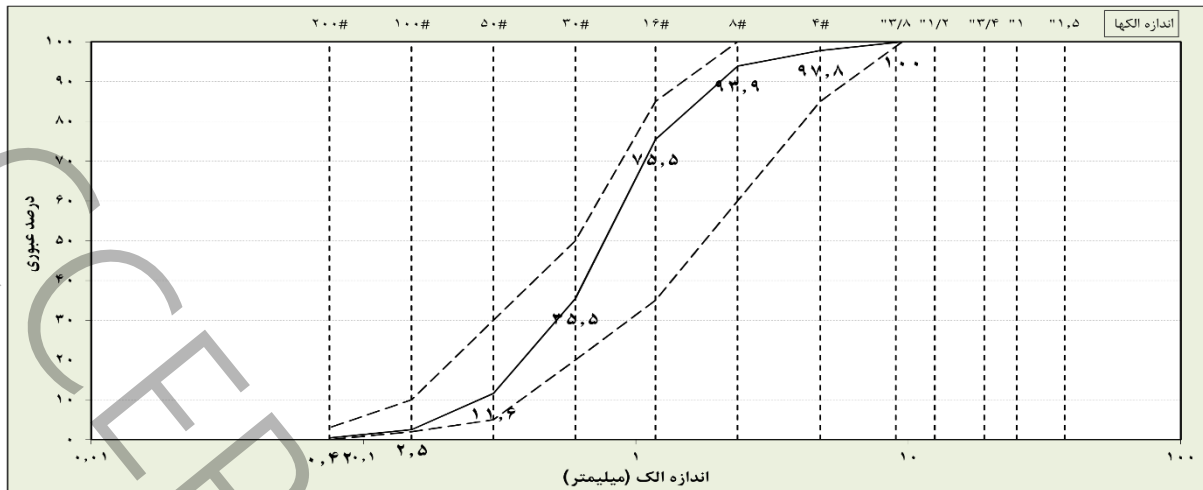
در راستای انجام آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها، بر روی نمونه تهیه شده از شن ۳/۸" مصرفی در تحقیق، آزمایش صورت پذیرفت که نتایج حاصل از آن در جدول ۸ بیان گردید؛ که ارائه این نتایج به صورت منحنی بر روی نمودار شکل ۱۱ نشان داد که درصد عبوری نمونه تهیه شده از شن ۳/۸" مصرفی در تحقیق از هر الک، مطابق استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲ و استانداردهای ASTM-D 422 و ASTM-C136، در محدوده تعیین شده قرار دارد و از نظر دانه‌بندی مناسب استفاده در تحقیق می‌باشد.



شکل ۱۱- منحنی دانه‌بندی شن ۳/۸" مصرفی در تحقیق

#### ۴-۱-۴- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی PET

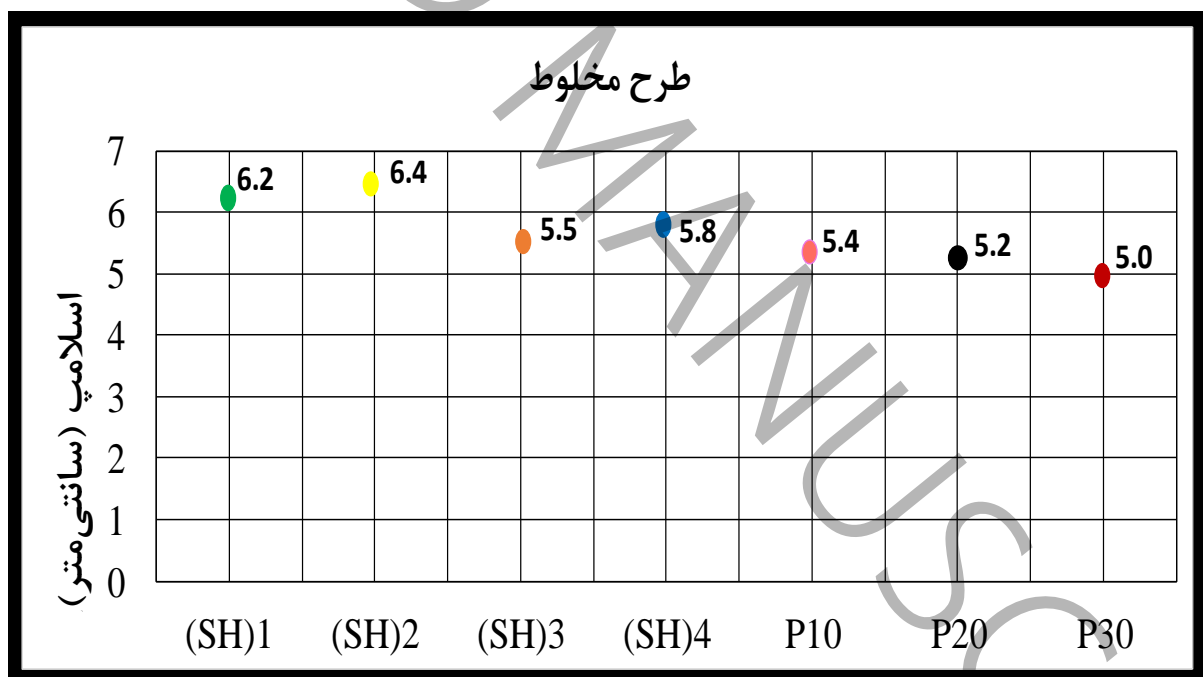
به‌مانند دیگر سنگدانه‌های مصرفی تحقیق، از سنگدانه‌های PET تهیه شده نیز نمونه‌ای برای انجام آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها تهیه گردید و آزمایش بر روی آن صورت پذیرفت. نتایج حاصل از انجام این آزمایش، در جدول ۹ بیان گردید و ارائه این نتایج به صورت منحنی در شکل ۱۲ نشان دهنده این بود که درصد عبوری از هر الک در محدوده تعیین شده در استانداردهای ASTM-D 422، ASTM-C136 و استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲ می‌باشد و از نظر دانه‌بندی مناسب استفاده شدن در تحقیق بوده است.



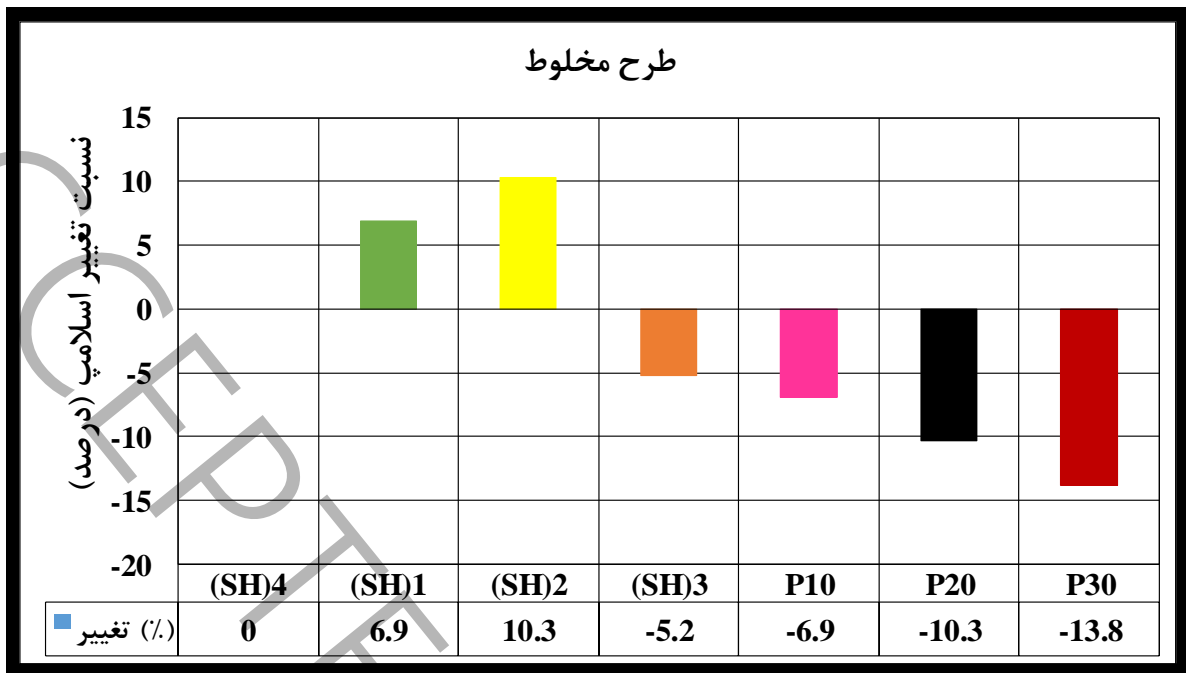
شکل ۱۲- منحنی دانه‌بندی PET، مصرفی در تحقیق

#### ۲-۴- تحلیل نتایج آزمایش اسلامپ بتن تازه

پس از تولید هر کدام از نمونه‌های بتن، مطابق با طرح‌های مخلوط مشخص گردیده برای تحقیق؛ آزمایش اسلامپ بر روی آنها انجام شد و نتایج آن در جدول ۱۰ بیان گردید؛ برای بررسی و تحلیل دقیق‌تر و بهتر نتایج آزمایش، این نتایج در شکل ۱۳، نشان داده شده‌اند؛ همچنین در شکل ۱۴ نسبت اسلامپ طرح‌های مخلوط با درصد‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ PET جایگزین لیکا (۴-۰) mm مصرفی تحقیق، به طرح مخلوط مرجع ارائه گردیده است.



شکل ۱۳- تغییرات اسلامپ طرح‌های مخلوط تحقیق



شکل ۱۴- نسبت اسلامپ طرح‌های مخلوط تحقیق به طرح مرجع

#### ۴-۲-۱- اسلامپ طرح‌های مخلوط اولیه

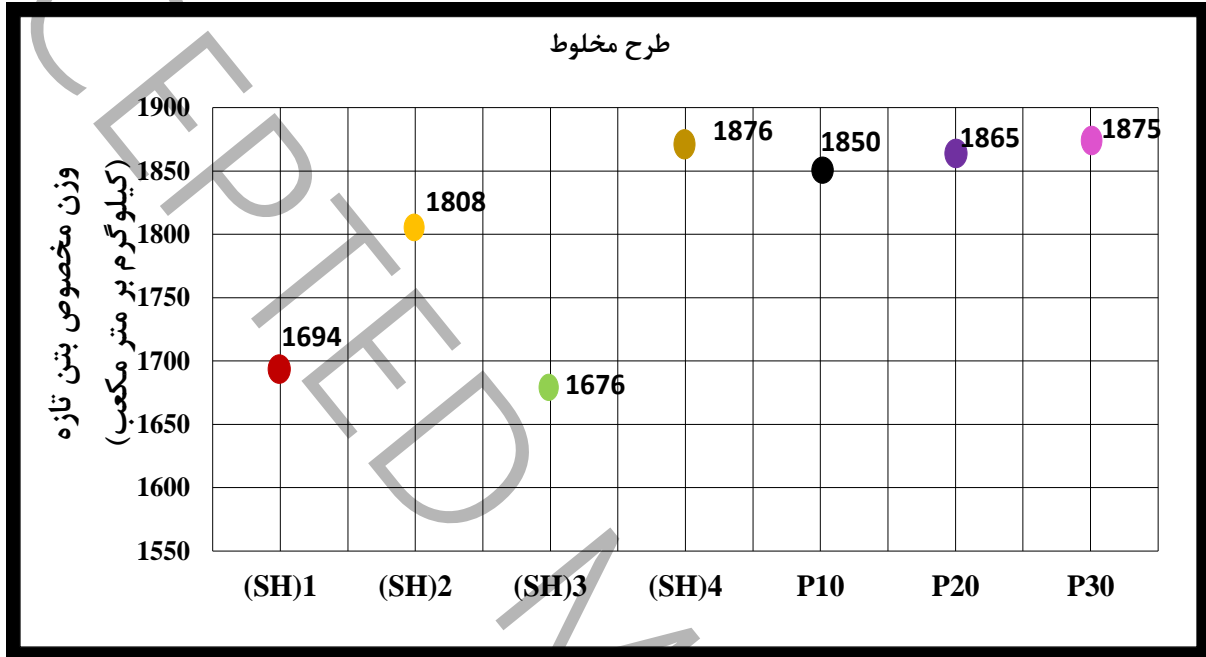
همان‌گونه که در نمودار ۵ مشاهده می‌کنید؛ طرح‌های مخلوط اولیه با نام‌های (SH)1، (SH)2، (SH)3 و (SH)4 نشان داده شده‌اند، طرح‌های مخلوط (SH)1 و (SH)2 نسبت آب به سیمان یکسان و معادل ۰/۴۲ داشتند و در باقی مصالح تشکیل دهنده طرح مخلوط به غیر از میزان لیکا ۴-۰ mm مصرفی، یکسان بودند؛ به‌گونه‌ای که لیکا ۴-۰ mm مصرفی طرح مخلوط (SH)2 یک سوم لیکا مصرفی طرح مخلوط (SH)1 بود همین امر سبب افزایش اسلامپ طرح مخلوط (SH)2 نسبت به طرح مخلوط (SH)1 گردید. این امر برای طرح‌های مخلوط (SH)3 و (SH)4 نیز اتفاق افتاد و مصالح تشکیل دهنده طرح‌های مخلوط به غیر از میزان لیکا ۴-۰ mm مصرفی، یکسان بودند و لیکا ۴-۰ mm مصرفی طرح مخلوط (SH)4 یک سوم لیکا مصرفی طرح مخلوط (SH)3 بود با این تفاوت که نسبت آب به سیمان طرح‌های مخلوط (SH)3 و (SH)4 یکسان و معادل ۰/۳۵ بود. همین افزایش مقدار لیکا ۴-۰ mm طرح مخلوط (SH)3 نسبت به طرح مخلوط (SH)4 سبب گردید که اسلامپ طرح مخلوط (SH)3 کمتر از اسلامپ طرح مخلوط (SH)4 باشد. اما در مجموع طرح‌های مخلوط (SH)3 و (SH)4 به دلیل نسبت آب به سیمان کمتر از طرح‌های مخلوط (SH)1 و (SH)2، اسلامپ کمتری نسبت به طرح‌های مخلوط (SH)1 و (SH)2 داشتند.

#### ۴-۲-۲- اسلامپ طرح‌های مخلوط حاوی پلی اتیلن ترفتالات

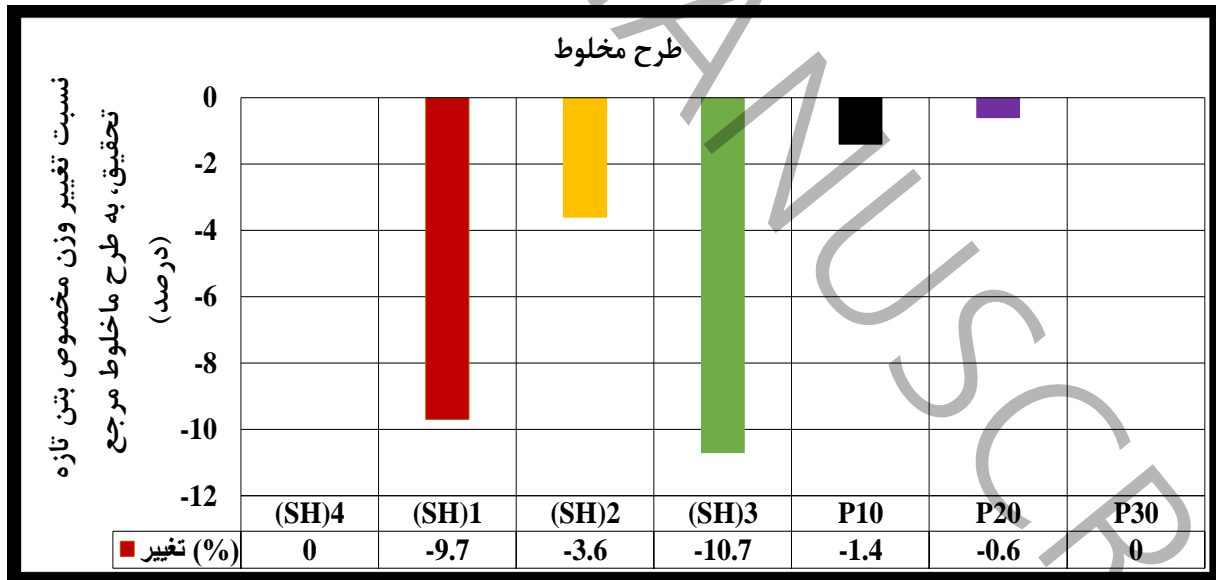
تمامی طرح‌های مخلوط حاوی PET همانند طرح مخلوط مرجع (SH)4 از نظر نوع و مقدار مصالح یکسان بودند و تنها در مقدار PET جایگزین درصدی از لیکا ۴-۰ mm، تفاوت داشتند. نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ بر روی نمونه‌های تهیه شده از این طرح‌های مخلوط که در شکل ۱۳ مشخص است نشان دهنده این نکته است که تمامی طرح‌های مخلوط حاوی PET، نسبت به طرح مرجع و با توجه به نتایج شکل ۱۴ با کاهش اسلامپ در محدوده ۸/۹-۱۳/۶٪، همراه بودند که نشان دهنده این نکته است که با افزایش مقدار PET در طرح‌های مخلوط حاوی PET، اسلامپ نسبت به خود طرح‌های مخلوط حاوی PET و همچنین نسبت به طرح مخلوط مرجع، کاهش می‌یابد.

### ۳-۴- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

پس از تولید بتن بر اساس طرح‌های مخلوط مشخص شده، به منظور تعیین وزن مخصوص بتن تازه تولید شده، آزمایش وزن مخصوص بتن تازه برای تمامی طرح‌های مخلوط انجام پذیرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها در جدول ۱۱ ارائه گردید و به منظور تجزیه و تحلیل بهتر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش وزن مخصوص بتن تازه، نتایج به‌صورت منحنی در شکل ۱۵ ارائه گردیده است و همچنین نسبت وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های مخلوط تحقیق، به طرح مخلوط مرجع (SH)4، در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- نتایج و تغییرات وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های مخلوط تحقیق به طرح مخلوط مرجع



شکل ۱۶- نسبت وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های مخلوط تحقیق به طرح مخلوط مرجع

### ۳-۴-۱- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح مخلوطها اولیه

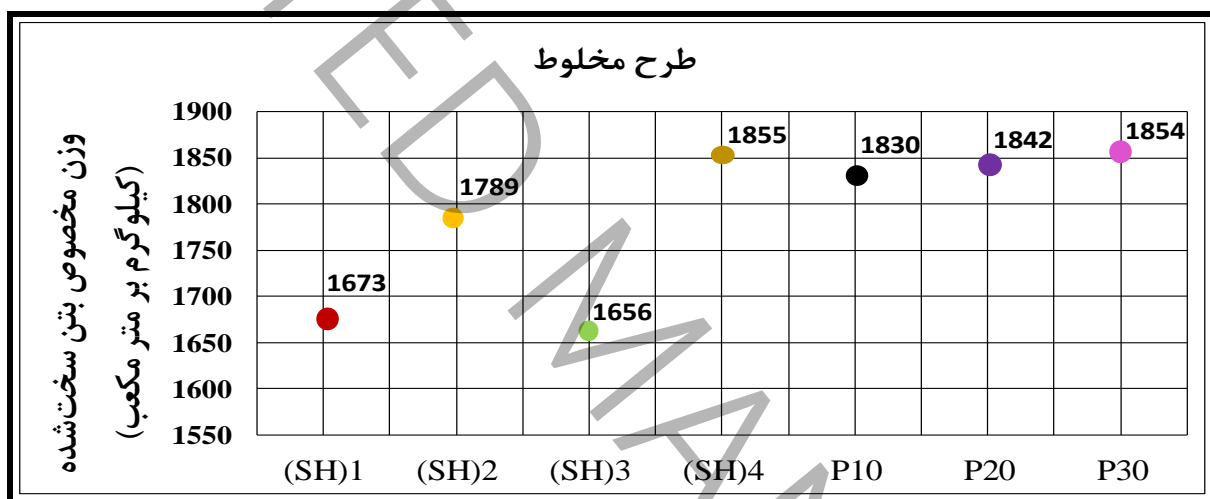
با توجه به شکل ۱۵، در طرح مخلوطها اولیه همان‌طور که قبلا ذکر شد، این طرح‌ها در تمامی مقادیر مصالح مصرفی، به جز مقدار آب و لیکا (۴-۰)، یکسان بودند. لذا با توجه به متغیر بودن مقدار آب و لیکا (۴-۰)، در تمامی این طرح‌ها، نتایج موجود در شکل ۱۵ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که در دو طرح مخلوط با مقدار آب یکسان، مانند (SH)1 و

(SH)2 یا (SH)3 و (SH)4))، طرحی که درصد بیشتری سبک‌دانه لیکا (۰-۴) mm در آن جایگزین شده است، وزن مخصوص کمتری دارد.

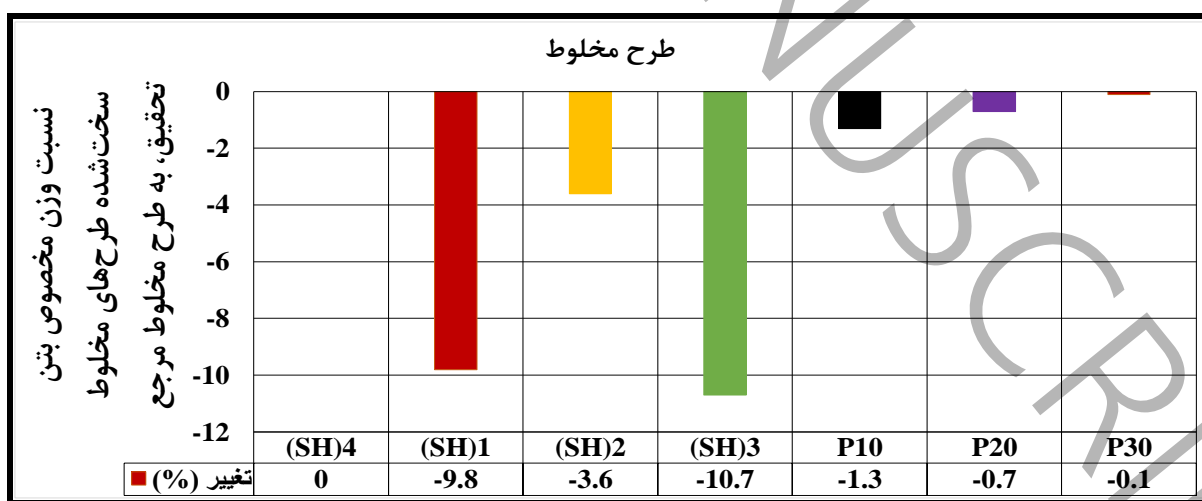
۲-۳-۴- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح مخلوط‌ها حاوی پلی اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا براساس شکل ۱۵، با جایگزینی ۱۰٪ PET با لیکا (۰-۴) mm، وزن مخصوص بتن تازه حاوی PET، از وزن مخصوص بتن تازه مرجع (SH)4، کمتر می‌باشد. اما همان‌طور که در نمودار مشخص است؛ با افزایش درصد جایگزینی PET در بتن با لیکا (۰-۴) mm، وزن مخصوص بتن تازه حاوی PET افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که با جایگزینی ۳۰٪ PET، وزن مخصوص بتن تازه حاوی PET، با وزن مخصوص بتن تازه مرجع (SH)4، تقریباً برابر می‌گردد.

#### ۴-۴- تحلیل نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت‌شده

پس از انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح مخلوط‌ها تحقیق، نتایج حاصل از آن در جدول ۱۲ ارائه گردید. سپس در این بخش نتایج به‌دست آمده از انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح مخلوط‌ها تحقیق، به‌صورت منحنی در شکل ۱۷ ارائه شد. در ادامه نیز نسبت وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح مخلوط‌ها تحقیق به طرح مخلوط مرجع (SH)4، در شکل ۱۸ ارائه گردیده است.



شکل ۱۷- نتایج و تغییرات وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح مخلوط‌های تحقیق نسبت به طرح مخلوط مرجع



شکل ۱۸- نسبت وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح‌های مخلوطی تحقیق نسبت به طرح مخلوط مرجع

#### ۴-۴-۱- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده طرح های مخلوط اولیه

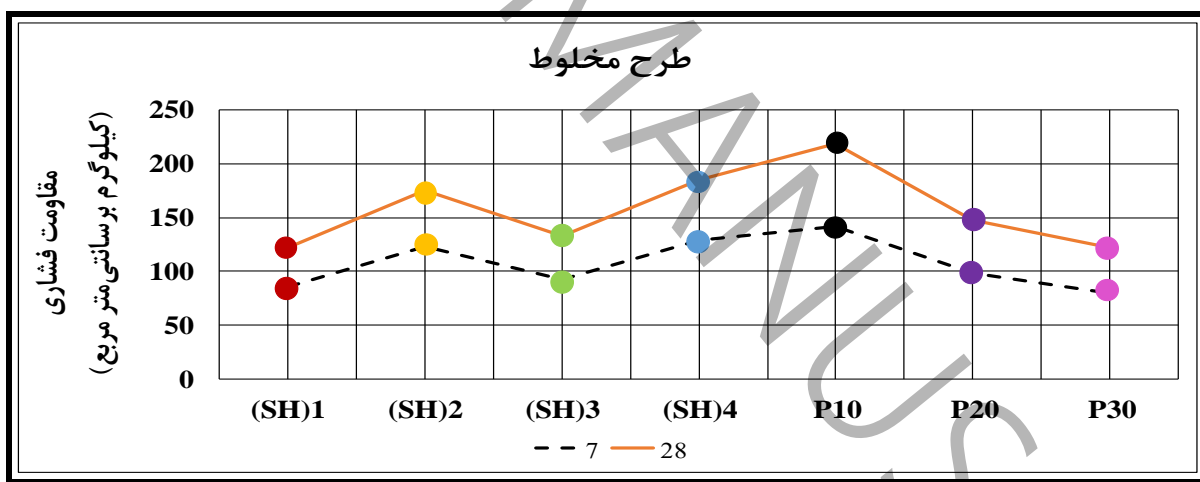
با توجه به شکل ۱۷، پس از سخت شدن بتن تولید شده براساس طرح های مخلوط اولیه و با توجه به این نکته که این طرح ها در تمامی مقادیر مصالح مصرفی، به جز مقدار آب و لیکا  $(0-4)$  mm، یکسان بودند و مقدار آب و لیکا  $(0-4)$  mm، در تمامی این طرح ها متغیر بوده است، نتایج حاصل از آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده طرح های مخلوط اولیه در شکل ۱۷ نشان داده شده اند. این نتایج نشان می دهند که به مانند نتایج حاصل از آزمایش وزن مخصوص بتن تازه، در دو طرح مخلوط با مقدار آب یکسان، مانند  $(SH)1$  و  $(SH)2$  یا  $(SH)3$  و  $(SH)4$ ، طرحی که درصد بیشتری سبکدانه لیکا  $(0-4)$  mm در آن جایگزین شده است، وزن مخصوص کمتری دارد.

#### ۴-۴-۲- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده طرح مخلوط های حاوی پلی اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

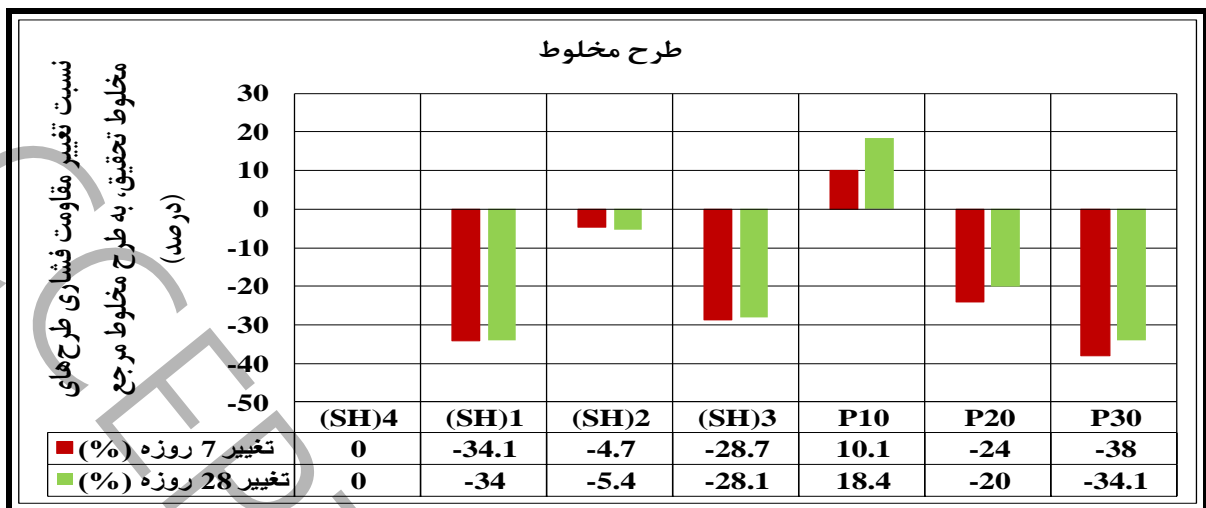
براساس شکل ۱۷، نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده حاصل از نمونه های تولید شده حاوی PET، نشان می دهد که پس از سخت شدن، همانند بتن تازه، با جایگزینی ۱۰٪ PET با لیکا  $(0-4)$  mm، وزن مخصوص بتن سخت شده حاوی PET، از وزن مخصوص بتن سخت شده مرجع  $(SH)4$ ، کمتر می گردد و با توجه به شکل ۱۷، با افزایش درصد جایگزینی PET به مقدار ۲۰٪ در بتن با لیکا  $(0-4)$  mm، وزن مخصوص بتن سخت شده حاوی PET افزایش می یابد. در این تحقیق، افزایش وزن مخصوص بتن سخت شده تا جایی ادامه می یابد که با جایگزینی ۳۰٪ PET، وزن مخصوص بتن سخت شده حاوی PET، با وزن مخصوص بتن سخت شده مرجع  $(SH)4$ ، تقریباً برابر می گردد.

#### ۴-۵- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۱۳ نشان داده شده اند. برای بررسی دقیق تر، نتایج به دست آمده، در شکل ۱۹ ارائه گردیده اند. همچنین برای تحلیل بهتر نتایج مقاومت فشاری، نسبت تغییر مقاومت فشاری طرح مخلوط ها تحقیق به طرح مخلوط مرجع  $(SH)4$ ، در شکل ۲۰ ارائه شده است.



شکل ۱۹- نتایج و تغییرات مقاومت فشاری نمونه های تولید شده مطابق با طرح مخلوط های تحقیق، براساس سن نمونه ها



شکل ۲۰- نسبت تغییر مقاومت فشاری طرح مخلوط های تحقیق به طرح مخلوط مرجع

#### ۴-۵-۱- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح مخلوط های اولیه

در جهت تولید بتن سبک سازه ای به جای ماسه معمولی از سبکدانه لیکا (۰-۴) mm استفاده شد. نکته واضح این است که با استفاده از این سبکدانه، علاوه بر کاهش وزن مخصوص، مقاومت فشاری نیز کاهش می یابد. حال با توجه به شکل ۱۹ و با توجه به اینکه طرح های مخلوط (SH) و (SH) نسبت آب به سیمان یکسان و معادل ۰/۴۲ داشتند؛ نتایج نشان می دهد که طرح مخلوط (SH) به علت دارا بودن مقدار بیشتر سبکدانه لیکا (۰-۴) mm به میزان ۳ برابر، نسبت به طرح مخلوط (SH) از مقاومت فشاری کمتری نسبت به طرح مخلوط (SH) برخوردار است. همین نکته در ارتباط با طرح های مخلوط (SH) و (SH) نیز صدق می کند؛ به گونه ای که در طرح های مخلوط (SH) و (SH) با وجود اینکه نسبت آب به سیمان یکسان و معادل ۰/۳۵ می باشد؛ مقاومت فشاری طرح مخلوط (SH)۴، به علت دارا بودن سبکدانه لیکا (۰-۴) mm کمتر نسبت به طرح مخلوط (SH)۳ به میزان ۱/۳، از مقاومت فشاری بیشتری برخوردار است. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره نمود؛ و در نتایج حاصل از شکل ۱۹ نیز کاملاً مشخص است؛ این نکته می باشد که طرح های مخلوط (SH)۱ و (SH)۳ و همچنین طرح های مخلوط (SH)۲ و (SH)۴ در تمامی مصالح مصرفی به غیر از آب؛ از نظر مقدار یکسان بودند؛ به گونه ای که نسبت آب به سیمان طرح مخلوط (SH)۱ بیشتر از نسبت آب به سیمان طرح مخلوط (SH)۳ و نسبت آب به سیمان طرح مخلوط (SH)۲ بیشتر از نسبت آب به سیمان طرح مخلوط (SH)۴ بود؛ و نتایج نیز نشان می دهد که طرح مخلوط (SH)۴ نسبت به طرح مخلوط (SH)۲ و طرح مخلوط (SH)۳ نسبت به طرح مخلوط (SH)۱ از مقاومت فشاری بیشتری برخوردار هستند که نشان می دهد کاهش نسبت آب به سیمان در طرح های مخلوط، سبب افزایش مقاومت فشاری می گردد.

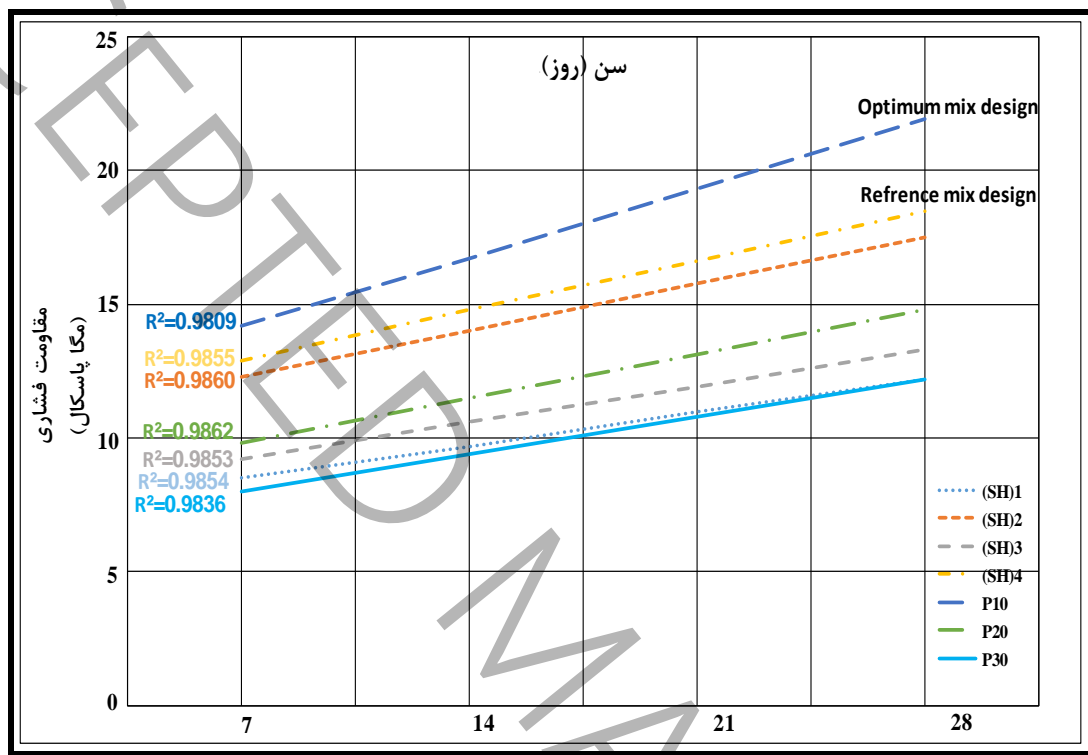
#### ۴-۵-۲- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح های مخلوط حاوی پلی اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۱۹ در طرح مخلوط P10، با افزایش مقدار PET به میزان ۱۰٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)۴ (PET)، جایگزین لیکا (۰-۴) mm، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه به میزان ۱۰٪ افزایش یافت و این افزایش مقاومت فشاری ادامه داشت؛ به گونه ای که در سن ۲۸ روزه ۱۸٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)۴، مقاومت فشاری بیشتری کسب نمود. اما نتایج نمودار شکل ۱۹ نشان می دهد در طرح مخلوط P20، که مقدار PET مصرفی در تحقیق ۲۰٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع، افزایش یافته است، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، به میزان ۲۴٪ درصد کاهش یافت و این کاهش ادامه داشت، تا جایی که در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری طرح مخلوط P20، به میزان ۲۰٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)۴، کمتر گردید. در ادامه تحقیق، در طرح مخلوط P30، با افزایش مقدار PET به ۳۰٪ مجدد شاهد کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)۴، بودیم با این تفاوت که این کاهش مقاومت فشاری، با شدت بیشتری نسبت به طرح مخلوط

P20، صورت پذیرفت؛ به گونه‌ای که مقاومت فشاری، در سن ۷ روزه به میزان ۳۸٪ و در سن ۲۸ روزه به میزان ۳۴٪، نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، کاهش یافت.

#### ۴-۵-۳- تحلیل روند رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها با زمان

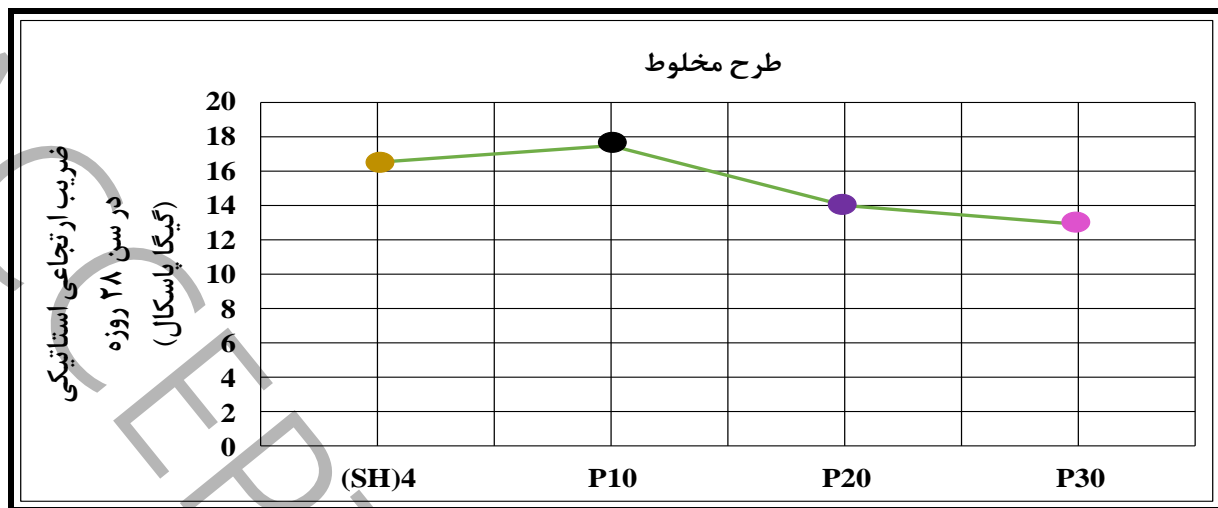
با توجه به رابطه و ضریب همبستگی، منحنی روند رشد مقاومت فشاری نمونه‌های تولید شده تحقیق با زمان مربوط به هر طرح مخلوط، در شکل ۲۱، ارائه گردید.



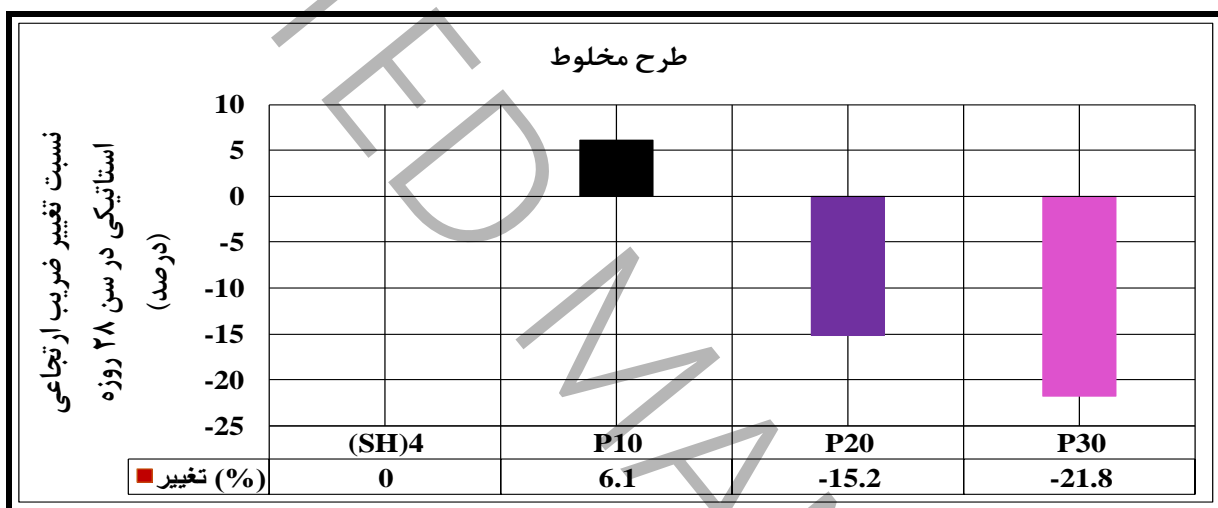
شکل ۲۱- رشد مقاومت فشاری با سن نمونه‌های تولیدشده در طرح‌های مخلوط مختلف تحقیق

#### ۴-۶- تحلیل نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن

ضریب ارتجاعی، یک پارامتر اساسی در طراحی سازه‌های بتنی است. در سال‌های اخیر مشخصات ساختمان، حتی نیازمند رعایت ضریب ارتجاعی خاص بتن بوده است که عمدتاً برای محدود کردن تغییر شکل و نوسان بیش از حد در ساختمان‌های بلند است [۵۸]. سختی بتن با ضریب ارتجاعی آن اندازه‌گیری می‌شود که نشانگر عالی مقاومت است. بتن با ضریب ارتجاعی بالاتر ممکن است قبل از ترد شدن، تنش بیشتری را تحمل کند؛ اما توجه به این نکته بسیار مهم است؛ که با افزایش ضریب ارتجاعی، بتن سفت‌تر و شکننده‌تر می‌شود [۵۹]. پس از انجام آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن بر روی نمونه‌های تولید شده بر اساس طرح مخلوط مرجع (SH)4 و طرح‌های مخلوط حاوی PET، نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، در جدول ۱۴ ارائه گردید. برای بررسی و تحلیل بهتر نتایج حاصل از آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن بر روی نمونه‌های تولید شده، این نتایج در شکل ۲۲ ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۲۳ نتایج حاصل از محاسبه نسبت ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح مخلوط‌های تحقیق نسبت به طرح مرجع، نشان داده شده است.



شکل ۲۲- نتایج ضرب ار تجاعی استاتیکی طرح‌های مخلوط تحقیق در سن ۲۸ روزه



شکل ۲۳- نسبت ضرب ار تجاعی استاتیکی طرح‌های مخلوط تحقیق به طرح مخلوط مرجع

#### ۴-۶-۱- تحلیل نتایج آزمایش ضرب ار تجاعی استاتیکی طرح مخلوط مرجع

پس از تولید نمونه‌های اولیه بر اساس طرح مخلوط‌های اولیه و رسیدن به طرح مخلوط مرجع (SH)4؛ همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد؛ برای رسیدن به ضرب ار تجاعی مینا، آزمایش ضرب ار تجاعی استاتیکی بر روی نمونه‌های تولید شده بر اساس طرح مخلوط مرجع (SH)4 انجام پذیرفت و ضرب ار تجاعی استاتیکی به مقدار ۱۶/۵ GPa برای آن ثبت گردید. ضرب ار تجاعی استاتیکی به‌دست آمده برای طرح مخلوط مرجع (SH)4، برای سنجش طرح‌های مخلوط حاوی PET، از لحاظ بهبود و افزایش و یا وخامت و کاهش ضرب ار تجاعی استاتیکی، استفاده گردید.

#### ۴-۶-۲- تحلیل نتایج آزمایش ضرب ار تجاعی استاتیکی طرح مخلوط‌های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

نمونه‌های تولید شده بر اساس طرح‌های مخلوط حاوی PET جایگزین لیکا (۴-۰) mm، تحت آزمایش ضرب ار تجاعی استاتیکی قرار گرفتند و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بر مبنای نتایج آزمایش ضرب ار تجاعی استاتیکی طرح مخلوط مرجع (SH)4، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از شکل ۲۲ نشان می‌دهد که در طرح مخلوط P10، با افزایش مقدار PET به میزان ۱۰٪، (PET) جایگزین لیکا (۴-۰) mm، نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، ضرب ار تجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه بهبود یافته و به میزان ۶/۱٪ افزایش یافته است. اما در ادامه با توجه به نتایج آزمایش‌ها و با توجه به شکل ۲۲، مشخص گردید که با افزایش مقدار جایگزینی PET با لیکا (۴-۰) mm به میزان ۲۰٪، در طرح مخلوط P20، نسبت به طرح مخلوط

مرجع SH4)، ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه دچار افت ناگهانی شده و به میزان ۱۵/۲٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، کاهش یافته است. در ادامه تحقیق نیز با توجه به نتایج شکل ۲۲ مشخص گردید که در طرح مخلوط P30، با افزایش مقدار PET، به میزان ۳۰٪، (PET) جایگزین لیکا (۴-۰) mm)، نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه، مجدداً نسبت به ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح مخلوط مرجع SH4)، دچار افت ناگهانی شده و با کاهش شدید، ضریب ارتجاعی استاتیکی به میزان ۲۱/۸٪، نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، کاهش یافت.

## ۵- جمع بندی

### ۵-۱- نتایج طرح مخلوط‌های اولیه

- با افزایش میزان سبکدانه لیکا (۴-۰) mm در طرح مخلوط‌های اولیه، اسلامپ کاهش یافت.
- با افزایش میزان سبکدانه لیکا در طرح مخلوط‌های اولیه، وزن مخصوص بتن سخت شده کاهش یافت.
- افزایش میزان سبکدانه لیکا در طرح مخلوط‌های اولیه، سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه گردید.
- امکان ساخت بتن سبک سازه‌ای بر اساس طرح مخلوط‌های SH2) و SH4) وجود دارد که طرح مخلوط SH4) از خواص مکانیکی برتری نسبت به طرح مخلوط SH2) برخوردار است.

### ۵-۲- نتایج طرح مخلوط‌های حاوی پلی اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

- با جایگزینی PET به میزان ۱۰٪ با سبکدانه لیکا اسلامپ طرح مخلوط‌های حاوی PET نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، کاهش یافت.
- با افزایش نسبت جایگزینی PET با سبکدانه لیکا، روند کاهش اسلامپ طرح مخلوط‌های حاوی PET نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، ادامه یافت.
- در طرح مخلوط P10، با جایگزینی مقدار PET به میزان ۱۰٪ با سبکدانه لیکا نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه به میزان ۱۰٪ افزایش یافت و این افزایش مقاومت فشاری ادامه داشت؛ به گونه‌ای که در سن ۲۸ روزه ۱۸٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، مقاومت فشاری بیشتری کسب نمود.
- در طرح مخلوط P20، با افزایش جایگزینی مقدار PET به میزان ۲۰٪ با سبکدانه لیکا نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، به میزان ۲۴٪ کاهش یافت و این کاهش ادامه داشت، تا جایی که در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری طرح مخلوط P20، به میزان ۲۰٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع کمتر گردید.
- در طرح مخلوط P30، با افزایش جایگزینی مقدار PET به میزان ۳۰٪ با سبکدانه لیکا مقاومت فشاری نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، کاهش یافت، با این تفاوت که این کاهش با شدت بیشتری نسبت به طرح مخلوط P20، صورت پذیرفت؛ به گونه‌ای که مقاومت فشاری، در سن ۷ روزه به میزان ۳۸٪ و در سن ۲۸ روزه به میزان ۳۴٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، افت کرد.
- در طرح مخلوط P10، جایگزینی مقدار PET با لیکا به میزان ۱۰٪، نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، سبب شد که ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه به میزان ۶/۱٪ افزایش یابد.
- جایگزینی PET با لیکا به میزان ۲۰٪، در طرح مخلوط P20، نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، سبب شد که ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه به میزان ۱۵/۲٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، افت نماید.
- در طرح مخلوط P30، با جایگزینی PET با لیکا به میزان ۳۰٪، ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه این مخلوط نسبت به طرح مخلوط مرجع SH4)، به میزان ۲۱/۸٪، افت کند.

## ۳-۵- پیشنهادها

در راستای تکمیل تحقیق در آینده و هم‌چنین به منظور بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن‌های سبک سازه‌ای حاوی PET و استفاده بیشتر از آنها در سازه‌ها، پیشنهادهایی به شرح زیر، ارائه می‌گردند:

- بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان، با درصد‌های متفاوت از درصد‌های استفاده شده در تحقیق، بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های سبک سازه‌ای حاوی PET
- کاربرد میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ساخت مخلوط‌های بتن، برای ارزیابی میزان تاثیر آن بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های سبک سازه‌ای حاوی PET
- ارزیابی استفاده از حداکثر میزان سبکدانه‌های سنگی، در ساخت بتن‌های سبک سازه‌ای حاوی PET، با حفظ حداقل‌های اجرایی خواص بتن‌ها
- ارزیابی عملکرد دوامی بتن‌های سبک حاوی سنگدانه‌های سبک‌پلی‌اتیلن ترفتالات و لیکا

## مراجع

- [۱] M. Rafiee, Porous Concrete Production Technology, Barakat Maryam Publications. (۲۰۱۹) ,
- [۲] T. Ganiron, Effect of sawdust as fine aggregate in concrete mixture for building construction, International Journal of Advanced Science and Technology, 63.۸۲-۷۳ (۲۰۱۴) (۱)
- [۳] W. Zhao, The implementation of new building materials in our country [J], The word garden, 4 (2013) 20.
- [۴] M. Mageswari, B. Vidivelli, The use of sawdust ash as fine aggregate replacement in concrete, J. Environ. Res. Dev, 3(3) (2009) 7.۷۲۶-۲۰
- [۵] A. Nowell, H. Translation: Famili, Concrete science (properties of concrete), Tehran, Iran University of Science and Technology. (۲۰۱۲) ,
- [۶] A. Anvari, AAC lightweight concrete and its application in the construction industry, Kotob daneshgahi publication. (۲۰۱۰) ,
- [۷] A. Khalilzadeh Vahidi, M. Roshani, M. Moradi, Evaluation of the characteristics and performance of lightweight concrete slabs, in: National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Management, 2014.
- [۸] K. Behfarnia, S. Abtahi, S. Hejazi, Laboratory investigation of porous concrete and the effect of additives on its mechanical properties, in: 6th National Civil Engineering Congress, 2011.
- [۹] A. Hillerborg, L. Elfgrén, S.P. Shah, Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics, Proceeding of International RILEM Workshop. (۱۹۸۹) ,
- [۱۰] J. Berenjani, E. Faghieh Maleki, S. Khoshnevisan, Study of effective parameters on concrete slabs, in: Fifth Annual National Conference of Iranian Concrete, 2013.
- [۱۱] M. Karamloo, M. Mazloom, G. Payganeh, Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete, Construction and Building Materials, 53 (2016) 508-515.
- [۱۲] A. Ali, Z. Soomro, S. Iqbal, N. Bhatti, A.F. Abro, Comparison of mechanical properties of lightweight and normal weight concretes reinforced with steel fibers, Engineering, Technology & Applied Science Research, 8(2) (2018) 2741-2744.
- [۱۳] K. Rebeiz, Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste, Construction and Building Materials, 10(3) (1996) 215-220.
- [۱۴] S. Hınıslioğlu, E. Ağar, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, Materials letters, 58(3-4) (2004) 267-271.
- [۱۵] T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui, Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber, Cement and Concrete Composites, 29(6) (2007) 448-455.

[16] C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, A. Gutierrez, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios, *Waste management*, 29(10) (2009) 2707–2716.

[17] Y.-W. Choi, D.-J. Moon, J.-S. Chung, S.-K. Cho, Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete, *Cement and concrete research*, 35(4) (2005) 776–781.

[18] D. Rumšys, D. Bačinskas, E. Spudulis, A. Meškėnas, Comparison of material properties of lightweight concrete with recycled polyethylene and expanded clay aggregates, *Procedia Engineering*, 172 (2016) 115–122.

[19] Y. Aocharoen, P. Chotickai, Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates, *Cleaner Engineering and Technology*, 12 (2023) 100600.

[20] A. Ghorbani, N. Abutaleb, Investigation of the effect of adding crushed polyethylene terephthalate waste as a substitute for cement in self-compacting concrete containing metakaolin and microsilica, *Civil & Project*, 1(1) (2019) 19–38.

[21] Y. Alkhaly, Y. Chandra, L. Widari, Experimental Study on Utilizing Polyethylene Terephthalate Waste as a Substitute for Coarse Aggregate in the Production of Lightweight Concrete, *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, 3(2) (2023) 17–24.

[22] K.A. Wiswamitra, S.M. Dewi, M.A. Choiron, A. Wibowo, Heat resistance of lightweight concrete with plastic aggregate from PET (polyethylene terephthalate)-mineral filler, *AIMS Materials Science*, 8(1) (2021) 99–118.

[23] S. Qaidi, Y. Al-Kamaki, I. Hakeem, A.F. Dulaimi, Y. Özkılıç, M. Sabri, V. Sergeev, Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates, *Frontiers in Materials*, 10 (2023) 1101146.

[24] J. Kodua, T. Tagbor, V. Berko-Boateng, K. Appiah, Influence of recycled waste high density polyethylene plastic aggregate on the physico-chemical and mechanical properties of concrete, *Doctoral dissertation* (2018).

[25] D. Kayentao, M. Tamboura, A.P. Diarra, M.F. Traore, A. Coulibaly, A.S. Toure, K. Daou, Modified concrete using polyethylene terephthalate plastic waste as a partial replacement for coarse aggregate, *Open J. Appl. Sci*, 13(06) (2023) 896–909.

[26] T.K. Ali, Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete Containing Different Ratios of PET as an Aggregate and Fiber, *Journal of Materials and Engineering Structures*, 5 (2018) 57–72.

[27] M. Askar, Y. Al-Kamaki, A. Hassan, Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review. *Polymers* 2023, 15, 3, 3320. *Polymers*, 15 (2023) 3320.

[28] A.O. Dawood, A.-K. Hayder, R.S. Falih, Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates, *Case Studies in Construction Materials*, 14(e00482) (2021) 1–13.

[29] C.K.A. Uche, S.A. Abubakar, S.N. Nnamchi, K.J. Ukagwu, Polyethylene terephthalate aggregates in structural lightweight concrete: a meta-analysis and review, *Discover Materials*, 3(1) (2023) 24.

[30] A.I. Al-Hadithi, N.N. Hilal, M. Al-Gburi, A.H. Midher, Structural behavior of reinforced lightweight self-compacting concrete beams using expanded polystyrene as coarse aggregate and containing polyethylene terephthalate fibers, *Structural Concrete*, 24(5) (2023) 5808–5826.

[31] D.R. Basri, P. Ningrum, A. Zaki, The effect of PET (polyethylene terephthalate) plastic on lightweight concrete, in: *4th International Conference on Sustainable Innovation 2020–Technology, Engineering and Agriculture (ICoSITEA 2020)*, Atlantis Press, 2021, pp. 98–101.

[32] K. Rebeiz, Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET, *Cement and Concrete Composites*, 17(2) (1995) 119–124.

- [۳۳]L.A.P. de Oliveira, J.P. Castro-Gomes, Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 1712–1717.
- [۳۴]I.M. Nikbin, S. Rahimi, H. Allahyari, F. Fallah, Feasibility study of waste Poly Ethylene Terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and lightweight concrete, *Journal of Cleaner Production*, 126 (2016) 108–117.
- [۳۵]M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste management*, 30(6) (2010) 1101–1106.
- [۳۶]K. Aswatama W, H. Suyoso, N. Meyfa U, P. Tedy, The effect of adding PET (polyethylen terephthalate) plastic waste on SCC (self-compacting concrete) to fresh concrete behavior and mechanical characteristics, in: *Journal of Physics Conference Series*, 2018, pp. 012023.
- [۳۷]S. ASTM, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, C127-07.(۲۰۰۷) ,
- [۳۸]S. ASTM, Standard Specification for Portland Cement, C150-07.(۲۰۰۷) ,
- [۳۹]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Portland cement – properties, Standard No. 389.(۲۰۲۰) ,
- [۴۰]S. ASTM, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, C136-06 , (۲۰۰۶)
- [۴۱]J. Savari, N. Jaafazadeh, A. Hassani, G. Shams Khoram Abadi, Physical and chemical quality of the drinking water in Ahvaz, *Journal of School of Public Health & Institute of Public Health Research*, 5(4.(۲۰۰۸) (
- [۴۲]A. Albaji, P. Ziarati, R. Shiralipour, Mercury and Lead contamination study of drinking water in Ahvaz, Iran, *Intl J Farm and Alli Sci*, 2 (2013) 751–755.
- [۴۳]S. ASTM, Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete, C1602.(۲۰۲۲) ,
- [۴۴]A.c. 211, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, *ACI Man. Concr. Pract*, (1991) 1–91.
- [۴۵]A.c. 304, Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete, *ACI Man. Concr. Pract*.(۲۰۰۰) ,
- [۴۶]S. ASTM, Standard practice for making and curing concrete test specimens in laboratory, C192/C192M.(۲۰۰۷) ,
- [۴۷]S. ASTM, Standard test method for particle-size analysis of soils, D422.(۲۰۰۲) ,
- [۴۸]T.A.O.f.S. Development, General Technical Specifications for Construction Works (Publication 55), Planning and Budget Organization Publications.(۲۰۰۹) ,
- [۴۹]S. ASTM, Standard Test Method for Density (Unit Weight) ,Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, C138/C138M.(۲۰۰۱) ,
- [۵۰]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Concrete - Determination of density (specific gravity), efficiency and air content of concrete (gravimetric method) - Test method, Standard No. 3821.(۲۰۱۹) ,
- [۵۱]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Hardened concrete - Density, water absorption and voids - Test method, Standard No. 15427.(۲۰۱۷) ,
- [۵۲]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Hardened Concrete - Determination of Compressive Strength of Test Samples, Standard No. 1608-3.(۲۰۱۴) ,
- [۵۳]C. Astm, Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. *Annual Book of ASTM Standards: Concrete and Aggregate*, C469-02 4.(۲۰۰۲)
- [۵۴]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Concrete - Determination of elastic modulus and Poisson's ratio of concrete - Test method, Standard No. 525.(۲۰۱۴) ,
- [۵۵]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Concrete - Manufacturing and curing of concrete specimens in the laboratory - Work procedure, Standard No. 5.(۲۰۱۴) ,<sup>۸۱</sup>
- [۵۶]T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Concrete - Manufacturing and curing of test specimens in the workshop - Work procedure, Standard No. 3205.(۲۰۱۶) ,

[<sup>٥٧</sup>]S. ASTM, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, C617.(١٩٩٨) ,

[<sup>٥٨</sup>]R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete, Journal of cleaner production, 112 (2016) 2171–2186.

[<sup>٥٩</sup>]B. Vakhshouri, S. Nejadi, Empirical models and design codes in prediction of modulus of elasticity of concrete, Frontiers of Structural and Civil Engineering, 13(1) (2019) 38–48.

ACCEPTED MANUSCRIPT