

Feasibility study of lightweight structural concrete using LECA and PET and determination of its mechanical properties

Seyed Fathollah Sajedi * , Ali Lefte Naami 

Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

ABSTRACT: Attention to lightness in modern construction and the need to produce and use lightweight concrete in tall buildings has also led researchers to use lightweight synthetic materials. The aim of the research is to replace natural sand with (0-4) mm LECA sand in the production of lightweight structural concrete. Therefore, four mix designs were made with LECA sand and water-to-cement ratios of 600 kg/m³ and 0.42 in the first and third designs, and 200 kg/m³ and 0.35 in the second and fourth designs. After determining the compressive strength of the samples, the fourth mix design was determined as the reference design. Next, three new mix designs were made with 10%, 20%, and 30% replacements of polyethylene terephthalate aggregates and LECA sand. Standard cubic and cylindrical samples were prepared to determine the compressive strength and static modulus of elasticity, respectively, and were cured in water for 28 days. For all mix designs, slump and specific gravity tests were performed in the fresh and hardened states of the concrete. The results showed that the design with 10% polyethylene terephthalate replacement with LECA sand achieved an increase in compressive strength and static modulus of elasticity of 18.4% and 6.1%, respectively, compared to the reference mix design. The results showed that it is possible to use polyethylene terephthalate aggregates to produce structural lightweight concrete, even in such a way that this type of concrete has superior mechanical properties compared to the reference concrete.

Review History:

Received: Nov. 20, 2024

Revised: Dec. 21, 2025

Accepted: May, 31, 2026

Available Online: Jul. 05, 2026

Keywords:

Structural Lightweight Concrete

Polyethylene Terephthalate Aggregates

Manufacturing Feasibility

Mechanical Properties

1- Introduction

In the construction of tall buildings, the weight of the structure must be considered. Now, considering that the components of these buildings are often made of concrete, the use of lightweight concrete reduces the weight of these buildings. The construction of lightweight buildings is a new topic in construction, the development of which will lead to the emergence of new methods in the production of lightweight concrete. Lightweight structural concretes have densities in the range of (1400-1900) kg/m³ and compressive strengths of more than 17 MPa, and in some cases, it is possible to increase the strength to 60 MPa. The goal of researchers is to achieve concrete that, in addition to being lightweight, also has acceptable strength, in a way that meets the increasing need of the construction industry for high strength on the one hand and low production cost on the other. In the last few decades, research has been conducted to reuse worn-out plastics. One of the proposed solutions for recycling and reusing these waste plastics in the field of civil engineering could be to utilize them in concrete production [1]. Therefore, it is interesting to study the effects of PET waste on the properties of various types of concrete, including

lightweight structural concrete, and research has also been conducted in this direction [2]. Ramses et al., in a study, compared the properties of lightweight concrete containing recycled polyethylene and expanded clay aggregates and observed that the concrete mixture with a density of kg/m³ (1950-2050) with high-density polyethylene plastic waste aggregates and low-density polyethylene plastic waste has a 28-day compressive strength higher than 40 MPa [3]. Considering that in previous research, PET replaced only a percentage of natural sand, the aim of this research is to investigate the possibility of using PET as a substitute for LECA in the production of structural lightweight concrete and to determine its effects on the mechanical properties of this type of concrete. Considering that the aim of this research is to assess the feasibility of producing lightweight structural concrete using PET aggregates and determine its mechanical properties, after various studies and using different mixing designs, to reduce the weight of concrete and produce lightweight structural concrete, while using PET aggregates, LECA aggregates with a size of (0-4) mm were used instead of regular sand; the LECA used in this research is LECA with a size of (0-4) mm because it is replaced with natural

*Corresponding author's email: fa.sajedi@iau.ac.ir

Table 1. Details of the lightweight structural concrete mix designs made in the research (kg/m³).

PET	Cement (kg)	water (lit)	LECA sand (0-4) mm	Pea gravel	Almond gravel	PET replacement ratio (%)	Mix name
0	350	122.5	200	400	800	0	(SH)4
20	350	122.5	180	400	800	10	P10
40	350	122.5	160	400	800	20	P20
60	350	122.5	140	400	800	30	P30

Table 2. Results of tests on lightweight structural concrete in the hardened state

Static elastic Modulus (GPa)	Compressive strength of standard cylindrical specimens (MPa)		Compressive strength of standard cubic specimens (MPa)		Mix design name
	Specimen' age (days)	Specimen' age (days)	Specimen' age (days)		
28	28	7	28	7	
16.5	18.5	12.9	23.0	16.1	(SH)4
17.5	21.9	14.2	27.4	17.7	P10
14	14.8	9.8	18.5	12.3	P20
12.9	12.2	8.0	15.2	10.0	P30

sand for the production of lightweight concrete. In this study, LECA (0-4) mm was completely replaced with sand and the PET present in the study was replaced with a percentage of LECA (0-4) mm; to investigate the mechanical properties of the concrete produced in this way and to compare and verify with previous studies in which the optimal percentage of PET consumption to increase the mechanical properties of the produced concrete was in the range of (10-15)%, PET with percentages of 10%, 20% and 30% was selected to replace LECA (0-4) mm and the results of the failure of the samples in the 7 and 28-day periods were examined in the form of three designs P10, P20 and P30 to determine the mechanical properties.

2- Research Mixing Designs

To ensure the lightweight and structural properties of the produced concrete, 100% LECA (0-4) mm was substituted for natural sand and a reference design was determined. PET with percentages of 10%, 20% and 30% was selected to replace LECA (0-4) mm and the results of the failure of the samples at 7 and 28 days were examined in three designs: P10, P20 and P30. Table 1 presents the details of the final research mixing designs. SH indicates the reference samples in the reference mix design and the number after it indicates its number among the initial mix designs. Also, in these designations, P indicates samples containing PET and the number after it indicates the percentage of PET in the samples

containing PET. For example, P20 indicates lightweight concrete containing 20% PET replaced with LECA.

3- Methods and Experiments

Cubic and cylindrical specimens were used in the experiments. Mechanical property tests included determining compressive strength in 7 mixing designs using standard cubic specimens in a water-immersion curing environment at 7 and 28 days of age, and determining the modulus of elasticity in 4 mixing designs using standard cylindrical specimens in a water-immersion curing environment at 28 days of age.

4- Analysis of Results

The analysis of the research results in the main article is presented in three sections: aggregate grading, fresh concrete, and hardened concrete. These results for hardened concrete are presented in Table 2. Since numerous tests have been conducted for grading, fresh concrete, and especially the mechanical properties of hardened concrete, and the volume of the results is large, it is not possible to present them in this abstract and readers are advised to refer to the main article.

5- Conclusions

- By replacing PET by 10% with LECA lightweight aggregate, the slump of the mixture design containing PET was reduced compared to the reference mixture design (SH)4.

- In the P10 mix design, by replacing the amount of PET by 10% with LECA lightweight aggregate compared to the reference mix design (SH)4, the compressive strength increased by 10% at 7 days and by 18% at 28 days compared to the reference mix design (SH)4.
- In the P20 mix design, by increasing the amount of PET by 20% with LECA lightweight aggregate compared to the reference mix design (SH)4, the compressive strength decreased by 24% at 7 days and by 20% at 28 days compared to the reference mix design
- In the P30 mix design, the compressive strength decreased by 38% at 7 days and by 34% at 28 days, compared to the reference mix design (SH)4.
- In the P10 mix design, replacing the amount of PET with 10% of LECA, compared to the reference mix design (SH)4, caused the static modulus of elasticity at the age of 28 days to increase by 1.6%.
- Replacing PET with 20% of LECA in the P20 mix design, compared to the reference mix design (SH)4, caused the static modulus of elasticity at the age of 28 days to

decrease by 15.2% compared to the reference mix design (SH)4.

- In the P30 mix design, by replacing PET with 30% LECA the static modulus of elasticity at the age of 28 days of this mix decreases by 21.8% compared to the reference mix design (SH)4.

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 (2017) 937-944.



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

سیدفتح اله ساجدی*^{ID}، علی لفته نعمانی^{ID}

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴

کلمات کلیدی:

بتن سبک سازه‌ای
سنگدانه‌های پلی اتیلن ترفتالات
امکان سنجی ساخت
خواص مکانیکی

خلاصه: 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 $mm(4-0)$ جایگزین شود. بنابراین، چهار طرح مخلوط با ماسه لیکا و نسبت آب به سیمان در طرح‌های اول و سوم به میزان $kg/m^3 600$ و $kg/m^3 420$ و در طرح‌های دوم و چهارم به میزان $kg/m^3 200$ و $kg/m^3 350$ 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 10% ، 20% و 30% از سنگدانه‌های پلی اتیلن 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 10% جایگزینی پلی اتیلن ترفتالات با ماسه لیکا، در مقادیر مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی به ترتیب به میزان $18/4\%$ و $6/1\%$ نسبت به طرح مخلوط مرجع افزایش حاصل شده است. نتایج نشان دادند که می‌توان با استفاده از سنگدانه‌های پلی اتیلن ترفتالات، نسبت به ساخت بتن سبک سازه‌ای اقدام نمود، حتی به گونه‌ای که این نوع بتن دارای خواص مکانیکی برتر نسبت به بتن مرجع باشد.

۱- مقدمه

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 سرپناه و دیگر امکانات زیربنایی در کشورهای درحال 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

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fa.sajedi@iau.ac.ir



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 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 1400 kg/m^3 (۸۰۰ - ۱۴۰۰) 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 $1900 - 1400 \text{ kg/m}^3$ و مقاومت فشاری بیش از 17 MPa هستند و در بعضی حالات، امکان افزایش مقاومت تا 60 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. ازجمله 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، ازجمله ضایعات و مواد بازیافتی می‌باشد. استفاده از مواد بازیافتی متفاوت در بتن، علاوه بر تأثیرات 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^۱ می‌باشد که به شکل‌های مختلفی ازجمله 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 ازجمله بتن سبک سازه‌ای، جالب توجه بوده و در این مسیر پژوهش‌هایی نیز صورت گرفته است [۱۷]. رامسس و همکاران^۲، در پژوهشی به مقایسه خواص بتن سبک حاوی پلی‌اتیلن بازیافتی و سنگدانه‌های رسی منبسط شده پرداختند و مشاهده کردند که ترکیب بتن با چگالی $(1950 - 2050) \text{ kg/m}^3$ با سنگدانه‌های زباله پلاستیکی پلی‌اتیلن با چگالی بالا^۳ و زباله پلاستیکی پلی‌اتیلن با چگالی کم^۴، دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالاتر از 40 MPa است [۱۸].

آئوچارون و چوتیکای^۵، به مطالعه اثرات نسبت آب به سیمان و سنگدانه‌های پلاستیک^۶ 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 $0/62$ و میزان 10% از سنگدانه‌های PET، مقاومت فشاری، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و نفوذ یون کلرید، به ترتیب $21/0\%$ ، $12/1\%$ و $17/3\%$ در مقایسه با نمونه بتن حاوی سنگدانه‌های معمولی، کاهش یافت [۱۹].

در ادامه تحقیقات در زمینه بتن‌های حاوی PET، قربانی و ابوطالب^۷

1. Polyethylene Terephthalate (PET)
2. Rumšys et al.
3. High-Density Polyethylene (HDPE)
4. Low-Density Polyethylene (LDPE)
5. Aocharoen and Chotickai
6. Plastic Aggregates (PAs)
7. Ghorbani and Abu Talib

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 2000 kg/m^3 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 0.71 W/K شد [۲۳].

کودوا^۵، تحقیقاتی را در زمینه تأثیر ضایعات بازیافتی سنگدانه‌های پلیاستیکی HDPE بر ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی و مکانیکی بتن، انجام داد. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که کارایی بتن تازه با افزایش میزان پلیاستیک کاهش یافت و مقاومت فشاری برای بتن معمولی، بیشتر از بتن دارای سنگدانه‌های پلیاستیکی HDPE، شد. همچنین جرم آب جذب شده توسط نمونه‌های بتن نیز، با افزایش محتوای پلیاستیک، افزایش یافت [۲۴].

کاینثاو و همکاران^۶، به بررسی بتن اصلاح شده با استفاده از ضایعات پلیاستیکی PET به عنوان جایگزینی جزئی برای سنگدانه‌های درشت، پرداختند. نتایج نشان داد که اسلامپ این بتن‌های تازه با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های پلیاستیکی 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^۷ 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 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 (۲-۱۰۰)٪، باعث کاهش ضریب ارتجاعی در محدوده (۱-۷۹)٪ شد [۲۶]. عسکر و همکاران^۸ 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. به‌طوری که به‌هنگام افزودن (۰/۱-۵/۲۵)٪ PET به مخلوط بتن، ۱۰-۱۰۰٪

به بررسی اثر افزودن ضایعات خرد شده PET جایگزین شده سیمان در بتن خودتراکم حاوی متاکاؤلین و میکروسلیس پرداختند و دریافتند که با افزایش درصد ذرات PET، وزن مخصوص بتن نیز تا حدودی کاهش می‌یابد، به‌طوری 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 آلخالی و همکاران^۱، 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^۲ 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 2219 kg/m^3 و 2109 kg/m^3 شد که با توجه به آنها، استفاده از بتن سبک را رد می‌کند. با این حال، با ۱۰۰٪ جایگزینی PET، بتن دارای وزن مخصوص 1855 kg/m^3 با مقاومت فشاری $14/16 \text{ MPa}$ بود که می‌تواند به عنوان بتن سبک سازه‌ای متوسط طبقه‌بندی شود [۲۱].

ویسوامیترا و همکاران^۳ نیز تحقیقاتی را در زمینه بررسی مقاومت حرارتی بتن سبک تولید شده با سنگدانه‌های پلیاستیکی از پرکننده معدنی PET، انجام دادند. نتایج کار آنها نشان داد که در دمای 100°C ، بتن با سنگدانه‌های پلیاستیکی شروع به ترک خوردن می‌کند که فقط با استفاده از میکروسکوپ دیجیتالی قابل مشاهده است. در حالی که در بتن مرجع، ترک‌ها در دمای 200°C شروع به ظاهر شدن کردند و وجود ترک باعث کاهش قابل توجه خصوصیات مکانیکی بتن شد. در حرارت 300°C و 400°C ، نمونه‌های دارای سنگدانه‌های پلیاستیکی به شکل زغالی درآمده و سوراخ‌ها و ترک‌های بیشتری با شکاف‌های بزرگ، به دلیل فرآیند تجزیه PET، بوجود آمد [۲۲].

در این زمینه، قیدی و همکاران^۴، یک مطالعه تجربی در مورد بررسی

5. Kodua
6. Kayentao et al.
7. Ali
8. Askar et al.

1. Alkhaly and Chandra
2. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)
3. Wiswamitra et al.
4. Qaidi et al.

دی اولیویرا و کاسترو-گومز^۸، 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، ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ در مخلوط ملات خشک استفاده شدند. سپس به طور خاص، خواص مکانیکی مانند مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و چقرمگی ملات اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که ادغام الیاف PET به طور 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^۹ 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^{۱۰} و بتن PET سبک^{۱۱} 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^{۱۲}، در تحقیقی به بررسی خواص رئولوژی و مکانیکی بتن ساخته شده از سنگدانه‌های PET تولید شده از بطری‌های PET زباله^{۱۳} 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].

اسواتاما و همکاران^{۱۴}، با بررسی نتایج تحقیقات پیشین و در جهت تکمیل تحقیقات در این زمینه، به تحقیق در زمینه تاثیر افزودن ضایعات پلاستیکی

(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^۱، 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^۲، تحقیقاتی را پیرامون ترکیب، خواص فیزیکی، خواص مقاومتی و دوام بتن حاوی سنگدانه‌های PET، انجام دادند. در نتیجه این تحقیقات، مشخص گردید که جذب آب به عنوان معیاری برای دوام بتن با افزودن سنگدانه‌های PET، افزایش یافت [۲۹].

الحديثی و همکاران^۳ نیز رفتار ساختاری تیرهای بتنی خودتراکم سبک تقویت شده با استفاده از پلی‌استایرن منبسط شده^۴ 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^۵، 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٪ و 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^۶ نیز در تحقیقی به بررسی خواص شیمیایی بتن پلیمری^۷ با کیفیت تولید شده از پلی‌استر غیر اشباع به دست آمده از PET پرداخت. نتایج نشان داد استفاده از PET بازیافتی می‌تواند به کاهش هزینه محصولات PC، صرفه جویی در مصرف انرژی و امکان دفع طولانی مدت ضایعات PET کمک کند [۳۲].

8. de Oliveira and Castro-Gomes

9. Nikbin et al.

10. Normal PET Concrete (NPC)

11. Lightweight PET Concrete (LWPC)

12. Frigione

13. Waste PET (WPET)

14. Aswatama et al.

1. Dawood et al.

2. Uche et al.

3. Al-Hadithi et al.

4. Expanded Polystyrene (EPS)

5. Basri et al.

6. Rebeiz

7. Polymer Concrete (PC)

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 $3/13 \text{ gr/cm}^3$ و سطح ویژه آن نیز $3050 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 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.

۲-۱-۳- سبکدانه لیکا $(4-0) \text{ mm}$

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^۲ با اندازه $(4-0) \text{ mm}$ 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 mm $(4-0)$ می‌باشد، که از کارخانه لیکا شهرستان زرنديه استان مرکزی تهیه گردید. جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی دانه لیکا را نشان می‌دهد. آزمایشات انجام شده نشان داده است PH این دانه‌ها حدود $7/2$ است و دانه‌های لیکا از نظر شیمیایی خنثی هستند.

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

PET به بتن خود تراکم^۱ 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 250°C تغییر نکرده است، در حالی که در دمای 600°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 $(60-75)\%$ از حجم بتن را تشکیل می‌دهند. از این مقدار $(60-70)\%$ از کل دانه‌ها شن و $(30-40)\%$ 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 $3/4\%$ یا بادامی، که از نظر اندازه اسمی، حداکثر 19 mm و شن $3/8\%$ یا نخودی، که از نظر اندازه اسمی، حداکثر $9/5 \text{ mm}$ 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 $3/4\%$ و شن $3/8\%$ مصرفی تحقیق انجام پذیرفت [37]؛ بر همین اساس وزن مخصوص شن $3/4\%$ در حالت اشباع با سطح خشک، $2/71 \text{ gr/cm}^3$ و وزن مخصوص ظاهری آن $1/67 \text{ gr/cm}^3$ تعیین گردید و همچنین پس از انجام آزمایش، وزن مخصوص شن $3/8\%$ در حالت اشباع با سطح خشک، $2/69 \text{ gr/cm}^3$ و وزن مخصوص ظاهری $1/69 \text{ cm}^3$ مشخص شد. همچنین با انجام آزمایش، تعیین گردید که جذب آب شن $3/4\%$ ، $0/87\%$ و جذب آب شن $3/8\%$ ، $0/94\%$ می‌باشد.

1. Self-Compacting Concrete (SCC)

2. Light Expanded Clay Aggregate (LECA)

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

Table 1. Chemical compositions of type 2 Portland cement used in the research.

مولفه‌های تعیین کننده آزمایش	نتیجه (%)	گستره (رواداری) محصول
LOI (افت حرارتی)	۱/۹	۲/۰±۰/۵
SiO ₂	۲۱/۰	-
Al ₂ O ₃	۴/۶	-
Fe ₂ O ₃	۳/۶	-
CaO	۶۲/۵	-
MgO	۳/۲	Max ۳/۵
SO ₃	۲/۴	۲/۲±۰/۵
A.E (قلیایی معادل)	۰/۷۶	-
IR (باقیمانده نامحلول)	۰/۰۴	-

جدول ۲. تجزیه شیمیایی سنگدانه لیکا (%)

Table 2. Chemical analysis of LECA aggregate (%).

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

۱-۴-۱-۲ 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:

الف- جمع‌آوری و انتقال

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

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^۱ 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، خشک‌کردن و در نهایت دانه‌بندی در اندازه‌های مختلف. در ادامه مراحل تولید سبکدانه PET توضیح داده شده است.

۱. 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.



شکل ۱. مرحله تفکیک و خردایش اولیه PET

Fig. 1. The initial separation and crushing stage of PET.

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 $^{\circ}\text{C}$ (۸۰-۹۰) تنظیم می‌شود. محلول شست‌وشو شامل آب، سود سوزآور^۴ 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.

ج- هم‌زدن مکانیکی و جداسازی آلودگی‌ها هم‌زن‌های مکانیکی یا سیستم‌های الکترومکانیکی باعث ایجاد آشفستگی 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^۵

پس از شست‌وشوی داغ، ذرات خردشده اولیه PET از چندین مرحله

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^۱ با استفاده از حسگرهای فروسرخ نزدیک^۲، 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^۳ و شست‌وشو جدا می‌شوند.

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

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

1. Optical Sorters
2. NearInfrared Sensors (NIR)
3. Pre-shredding

4. Sodium hydroxide (NaOH)
5. Rinsing



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

Fig. 2. Hot wash tank used to clean PET flakes.

خردشده اولیه PET عبور کرده و رطوبت سطحی آن‌ها را کاهش می‌دهد تا به سطح رطوبت مناسب برای ذخیره‌سازی و دانه‌بندی (اغلب رطوبت کمتر از ۱-۲٪) 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.

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^۵

- 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 ...)

5. Vibrating Screens

آبکشی عبور می‌کنند تا باقیمانده مواد قلیایی و شوینده کاملاً حذف شود و pH سطحی آن‌ها به محدوده خنثی (نزدیک به pH=۷) 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.

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

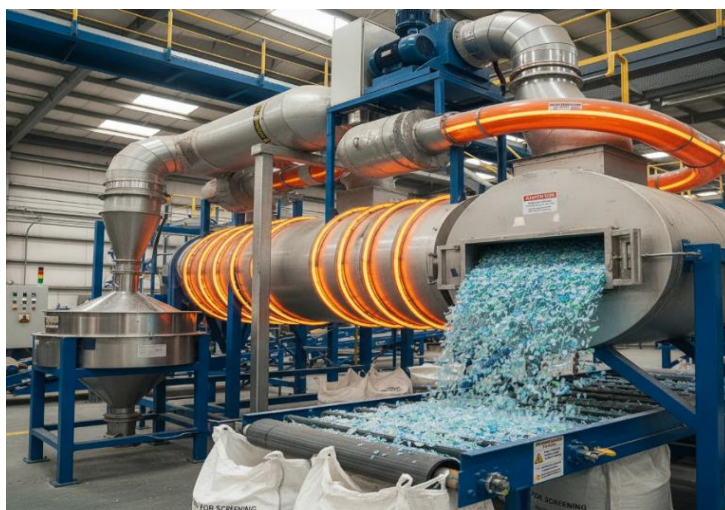
پس از شست‌وشوی داغ و آبکشی، ذرات خردشده اولیه PET دارای رطوبت سطحی قابل توجهی هستند و باید قبل از دانه‌بندی و استفاده در بتن، خشک شوند.

الف- آب‌گیری مکانیکی^۱

ذرات خردشده اولیه PET، ابتدا وارد گریزانه^۲ 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^۳ و سپس خشک‌کن‌های حرارتی^۴ عبور داده می‌شوند. هوای گرم با دمای کنترل‌شده از میان ذرات

1. Mechanical Dewatering
2. Centrifugus
3. Centrifugal Dryer
4. Thermal Dryers



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

Fig. 3. Mechanical dewatering and thermal drying of heated washed PET flakes, prior to particle size distribution.

چسبندگی بین خمیر سیمان و پلاستیک (ناحیه ITZ) نسبت به PET خام به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا می‌کند.

۲-۱-۵- 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^۱ ارزیابی شده است؛ طبق این مطالعه، میانگین مقادیر pH^2 ، TDS^3 و سختی آب به ترتیب حدود ۷/۳، ۱۰۰۰ mg/L و ۱۰۹ mg/L گزارش شده و شاخص پایداری رایزنر^۴ 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

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 کرد؛ محدوده‌های دانه‌بندی معمول عبارت‌اند از:

✓ PET در محدوده ۴-۱۰)mm (جایگزین ماسه طبیعی یا لیکای ریز دانه)

✓ PET در محدوده ۴-۸)mm (میان دانه)

✓ PET در محدوده ۸-۱۲)mm (درشت‌دانه)

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.

۵-۴-۱-۲- ویژگی‌های محصول نهایی

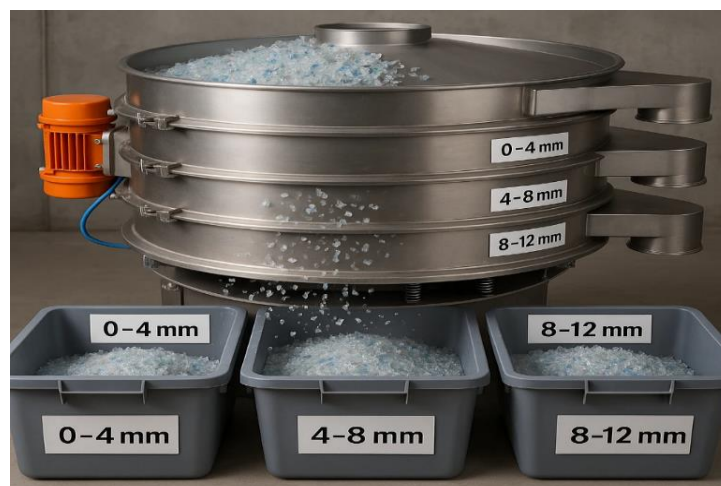
خروجی این فرآیند، سنگدانه‌های PET با سطحی تمیز و بدون چربی، رنگ‌زدایی‌شده و با چگالی ظاهری در حدود $1.03-1.04 \text{ gr/cm}^3$ است. بسته به نوع دانه‌بندی، این مواد می‌توانند به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌های طبیعی یا لیکا در طرح‌های بتن سبک استفاده شوند. از آنجا که سطح PET پس از فرآیند شست‌وشوی داغ، کاملاً تمیز و زبر می‌شود،

1. Savari et al.

2. Potential of Hydrogen (pH)

3. Total Dissolved Solids (TDS)

4. Ryznar Stability Index (RSI)



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

Fig. 4. Separation and granulation of dried PET in an industrial vibrating screen unit to separate different granulation ranges.

ASTM، 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.

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

آب آشامیدنی شهر اهواز را بررسی کرد که نتایج آن در جدول ۳ قرار داده شده است [۴۱].

در تحقیقی دیگر، بر اساس مطالعه الباجی و همکاران^۱ و در تکمیل تحقیقات گذشته در این زمینه، کیفیت آب لوله‌کشی شهر اهواز از نظر برخی فلزات سنگین شامل سرب^۲، کادمیم^۳ و جیوه^۴ 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 ۰/۰۱۲ mg/L (زیر حد WHO)، و غلظت جیوه برابر ۰/۰۰۴۷ mg/L، اندازه‌گیری شده که اگرچه مقادیر Cd در محدوده قابل قبول استاندارد 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 C1602

1. Albaji et al.
2. Lead (Pb)
3. Cadmium (Cd)
4. Mercury (Hg)

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

Table 3. Physical-chemical analysis of drinking water in Ahvaz city.

توضیح	واحد	مقدار متوسط	پارامتر
در زمان نمونه برداری	°C	۱۹	دما
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	μS/cm	۱۶۷۸	هدایت الکتریکی (EC)
بیشتر از حد توصیه (۵۰۰) WHO، ولی در ایران رایج است	mg/L	۱۰۰۶	TDS (کل جامدات محلول)
قلیائیت متوسط	به صورت mg/L CaCO ₃	۱۲۹	قلیائیت کل
سختی نسبتاً زیاد	mg/L	۱۰۹	کلسیم (Ca ²⁺)
قابل قبول	mg/L	۶/۷۸	اکسیژن محلول (DO)
زیر حد حداکثر مجاز ایران (معمولاً ۶۰۰-۲۵۰) ولی نسبتاً بالا	mg/L	۲۹۳	کلراید (Cl ⁻)
زیر حد مجاز ایران (حدود ۵۰۰-۴۰۰)	mg/L	۲۶۴	سولفات (SO ₄ ²⁻)
نشان دهنده خاصیت خوردگی آب	—	۸/۴۳	Ryznar شاخص پایداری رایزنر

بررسی خواص مکانیکی آنها، طرح مخاوط با کد (SH)4، مناسبترین طرح به جهت تامین نیازهای تحقیق مشخص گردیده و به عنوان طرح مخاوط 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 مقدار وزنی سیمان تمام طرح‌های مخاوط 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) mm (۴-۰) آنها از نظر وزنی متغیر بود، به‌گونه‌ای که اولین طرح مخاوط اولیه، با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و مقدار ۶۰۰ kg/m³ لیکا (۴-۰) mm و ۱۴۷ کیلوگرم آب، و طرح مخاوط دوم نیز با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و مقدار ۲۰۰ kg/m³ لیکا (۴-۰) mm و ۱۴۷ کیلوگرم آب، و طرح مخاوط سوم با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و مقدار ۶۰۰ kg/m³ لیکا (۴-۰) mm و ۱۲۲/۵ کیلوگرم آب، و طرح مخاوط چهارم نیز با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و مقدار ۲۰۰ kg/m³ لیکا (۴-۰) mm و ۱۲۲/۵ کیلوگرم آب می‌باشد. در جدول ۴ جزئیات طرح‌های مخلوط اولیه برای رسیدن به طرح مخاوط مرجع ارائه گردیده است. در نام‌گذاری طرح‌های مخلوط اولیه، SH نام طرح مخاوط اولیه و اعداد مقابل آن شماره طرح می‌باشند.

پس از تهیه نمونه‌ها از طرح مخلوط‌های اولیه، و انجام آزمایش‌ها برای

جدول ۴. جزئیات طرح مخلوط‌های اولیه.

Table 4. Details of the initial mix designs.

کد طرح	مقدار مصالح (kg/m ³)			
	مقدار سیمان	آب	شن ۳/۴"	شن ۳/۸" ماسه لیکا (۴-۰) mm
(SH)1	۳۵۰	۱۴۷	۸۰۰	۴۰۰
(SH)2	۳۵۰	۱۴۷	۸۰۰	۲۰۰
(SH)3	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰
(SH)4	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۲۰۰

جدول ۵. جزئیات طرح مخلوط‌های نهایی.

Table 5. Details of the final mix designs.

کد طرح	نسبت جایگزینی (%)	مقدار مصالح (kg/m ³)				
		PET	مقدار سیمان	آب	شن ۳/۴"	شن ۳/۸" ماسه لیکا (۴-۰) mm
(SH)4	۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰
P10	۱۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۱۸۰
P20	۲۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۱۶۰
P30	۳۰	۳۵۰	۱۲۲/۵	۸۰۰	۴۰۰	۱۴۰

نکند، مرطوب گردید. سپس در مرحله اول کل مقدار شن به‌علاوه یک دوم مقدار سیمان به‌علاوه یک دوم آب مصرفی در بتن را درون مخلوط‌کن قرار داده و اجازه می‌دهیم به مدت سه دقیقه با سرعت ۳۰ rpm^۱ مواد را با یکدیگر مخلوط نماید. در مرحله دوم کل مقدار لیکا (۴-۰) mm و PET مصرفی تحقیق به‌علاوه 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. به‌این‌منظور ابتدا

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.

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 به‌منظور جلوگیری نمودن از دست دادن رطوبت استاندارد سنگدانه‌ها، دیواره داخلی مخلوط‌کن به میزانی که رطوبت اضافی به سنگدانه‌ها اضافه

1. Revolution per minute (rpm)

جدول ۶. مشخصات نمونه‌های بتنی تولید شده.

Table 6. Specifications of the produced concrete specimens.

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

انجام پذیرفت [۴۷]. در جداول ۷ تا ۱۰ به ترتیب دانه‌بندی مربوط به لیکا mm (۰-۴)، شن ۳/۴"، شن ۳/۸" و PET مصرفی تحقیق، ارائه گردیده است.

۳-۲- آزمایش‌های بتن تازه

۳-۲-۱- آزمایش اسلامپ

اولین کنترلی که بر روی نمونه بتن انجام می‌شود، 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.

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

در این تحقیق، آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه، برای اندازه‌گیری 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.

۳-۳- آزمایش‌های بتن سخت شده

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

پس از آنکه نمونه‌های بتنی تهیه شده مطابق طرح مخلوط‌ها به مدت ۲۸ روز درون آب استخر مخصوص، عمل‌آوری شدند؛ آزمایش تعیین وزن مخصوص نمونه‌های بتنی سخت‌شده؛ مطابق استاندارد ۱۵۴۲۷ ایران، انجام پذیرفت [۵۱]. هدف از انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص، درصد جذب و درصد حفرات در بتن سخت‌شده است. این آزمایش در توسعه داده‌های مورد نیاز جهت تبدیل جرم و حجم در بتن مناسب و مفید است. و همچنین

قالب‌های نمونه‌گیری را آماده می‌نماییم. قالب نمونه‌گیری باید تمیز و عاری از هرگونه بتن و مواد سیمانی باشد. سپس به‌منظور راحتی در جداسازی نمونه‌ها از قالب، بعد از سخت شدن بتن؛ به صورت یک لایه بسیار نازک تمامی سطوح داخلی قالب‌ها را به‌وسیله 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 آماده‌شده ریخته شد و توسط یک میله‌ی گرد به قطر mm ۱۶ 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 به‌وسیله 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 به‌گونه‌ای که رطوبت نسبی کمتر از ۹۰٪ نباشد، به مدت 24 ± 2 ساعت به‌صورت 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، 20 ± 2 °C بود (شکل ۵). در جدول ۶ مشخصات نمونه‌های بتنی تولید شده، ارائه شده است.

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



ب: اختلاط مصالح تحقیق



الف: مصالح مصرفی تحقیق



ث: انجام آزمایش اسلامپ



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.

Fig. 5. Steps for manufacturing, sampling, and processing specimens.

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

Table 6. LECA grain size (0-4) mm, used in research.

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

جدول ۸. مشخصات نمونه‌های بتنی تولید شده.

Table 8. Gravel grading 3/4", used in research.

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

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

Table 9. Gravel grading 3/8", used in research.

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

جدول ۱۰. دانه‌بندی PET، مصرفی در تحقیق.

Table 10. PET granulation, used in research.

وزن عبور کرده (%)	وزن باقی‌مانده (%)		اندازه استاندارد / شماره الک	سوراخ‌های الک	
	تجمعی	جزئی		میلی‌متر	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	

جدول ۱۱. نتایج آزمایش اسلامپ بتن تازه طرح‌های تحقیق.

Table 11. Slump test results of fresh concrete research projects.

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

جدول ۱۲. نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های تحقیق.

Table 12. Fresh concrete specific gravity test results research designs

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

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 ۱۵ 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

برای مشخص کردن تطابق بین ویژگی‌های بتن و نشان دادن تفاوت بین قسمت‌های 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 سخت شده طرح های تحقیق.

Table 13. Hardened specific gravity test results of research designs.

P30	P20	P10	(SH)4	(SH)3	(SH)2	(SH)1	کد طرح
۱۸۵۴	۱۸۴۲	۱۸۳۰	۱۸۵۵	۱۶۵۶	۱۷۸۹	۱۶۷۳	وزن مخصوص بتن سخت شده (kg/m^3)



شکل ۶. آماده سازی نمونه های استاندارد بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری.

Fig. 6. Preparing standard concrete specimens for compressive strength testing.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- تحلیل نتایج آزمایش دانه بندی سنگدانه ها

نتایج حاصل از آزمایش های دانه بندی لیکا (۴-۰)، شن «۳/۴»، شن «۳/۸» و PET مصرفی در تحقیق به ترتیب در جدول های ۶ تا ۹ نشان داده شد. برای تجزیه و تحلیل دقیق تر نتایج حاصل از آزمایش های دانه بندی سنگدانه های مصرفی در تحقیق، در فصل چهارم، این نتایج به ترتیب در شکل های ۹ تا ۱۲ ارائه گردید.

۴-۱-۱- تحلیل نتایج آزمایش دانه بندی لیکا (۴-۰) mm

پس از تهیه سنگدانه لیکا (۴-۰) mm مورد استفاده در تحقیق، بر روی نمونه ای از آن آزمایش دانه بندی انجام شد و نتایج آن در جدول ۶ بیان گردید. نتایج به صورت منحنی در شکل ۹ نشان داد که درصدهای

زمانی که اولین ترک در نمونه اتفاق افتاد، نحوه تهیه گزارش آزمون مقاومت فشاری به این گونه می باشد که حداکثر نیروی وارده بر سطح مبنا یا سطح واقعی تقسیم می شود تا مقاومت فشاری آزمون به دست آید. نتیجه مقاومت با دقت 5 kg/cm^2 گزارش شد. مقدار تنش لحظه شکست، مقاومت فشاری است. نتایج آزمون مقاومت فشاری، برای آزمون های مکعبی استاندارد بود که بر اساس ضرایب تبدیل مقاومت آزمون های مکعبی به استوانه ای، نتایج آزمون مقاومت فشاری آزمون های مکعبی به آزمون های استوانه ای تبدیل گردید. در شکل ۶ آماده سازی نمونه های استاندارد بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.

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

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. آزمون ها طبق استانداردهای شماره ۵۸۱ و ۳۲۰۵ استاندارد ملی ایران قالب گیری شده و تا زمان آزمون تحت شرایط عمل آوری یادشده، نگهداری شدند [۵۵، ۵۶]. آزمون ها ظرف مدت یک ساعت بعد از خارج کردن از محیط عمل آوری یا مخزن نگهداری، آزمون شدند و تا زمان آزمون، با یک پارچه مرطوب پوشانده شدند. سطوح انتهایی آزمون ها با دقت ± 0.5 درجه عمود بر محور بوده و با دقت 0.5 mm مسطح شدند؛ به این منظور، به علت اینکه سطوح آزمون های قالب گیری شده صاف و تراز نبودند، طبق استاندارد ASTM C 617 سطح آنها از طریق پوشش شده و یا به اصطلاح کلاهی گذاری شدند [۵۷].

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

1. Capping

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

Table 14. Compressive strength test results of cubic specimens and those converted into standard cylindrical concrete specimens.

مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (kg/cm ²) (تبدیل شده با استفاده از ضرایب تبدیل مقاومت نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای)		مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ cm (kg/cm ²)		کد طرح
سن نمونه (روز)		سن نمونه (روز)		
۲۸	۷	۲۸	۷	
۱۲۲	۸۵	۱۵۳	۱۰۶	(SH)1
۱۷۵	۱۲۳	۲۱۸	۱۵۳	(SH)2
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

جدول ۱۵. نتایج حاصل از انجام آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی.

Table 15. Results from static elasticity coefficient testing.

P30	P20	P10	(SH)4	کد طرح	سن نمونه (روز)
۱۲/۹	۱۴	۱۷/۵	۱۶/۵	ضریب ارتجاعی (GPa)	۲۸



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

Fig. 7. Preparing specimens for testing the static modulus of elasticity of concrete.

عبوری از هر الک در محدوده تعیین شده بر اساس استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲ و استانداردهای ASTM-C136 و ASTM-D 422 می‌باشد و بر این اساس از نظر دانه‌بندی، برای استفاده در تحقیق مناسب می‌باشد.

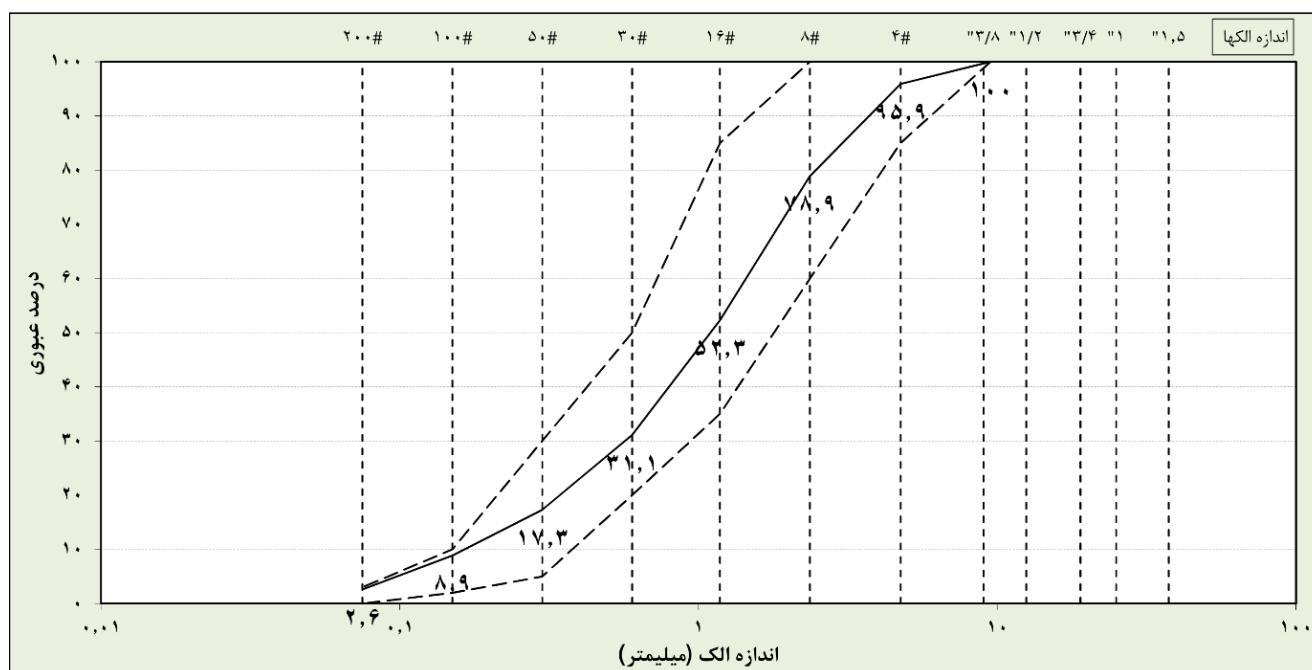
۴-۱-۲- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی شن ۳/۴"

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-C136 و ASTM-D 422، تعیین شده است و مشخص گردید که شن ۳/۴" تهیه شده برای انجام تحقیق، از نظر دانه‌بندی مطابق استاندارد و مناسب می‌باشد.



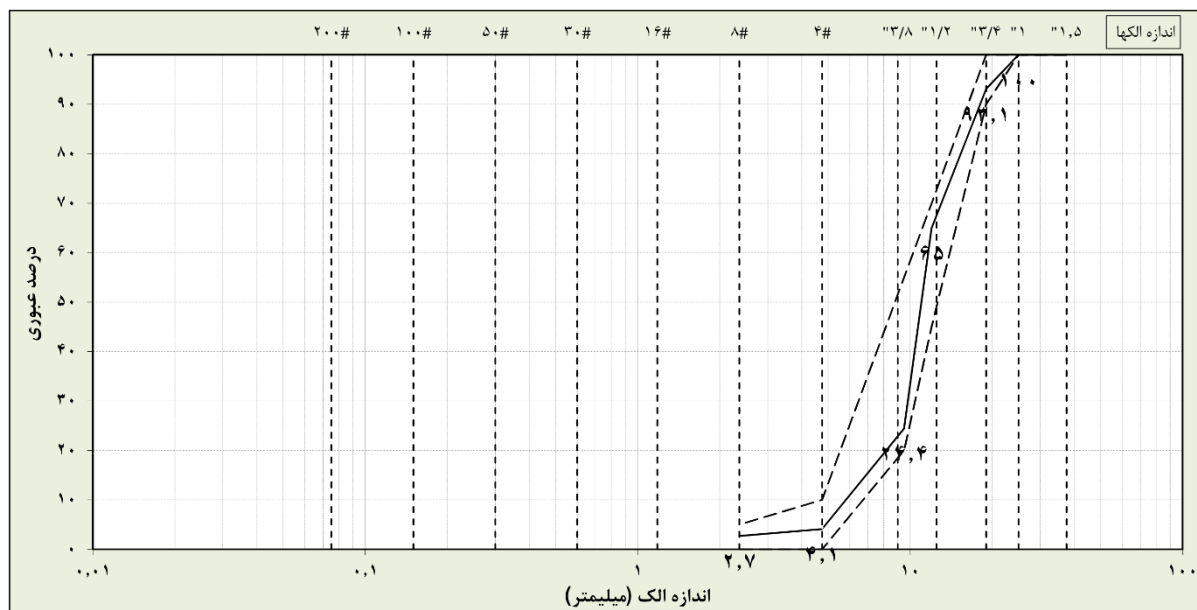
شکل ۸. روند انجام آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن.

Fig. 8. The process of performing a test to determine the static modulus of elasticity of concrete.



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

Fig. 9. LECA (0-4) mm grain size curve, used in research.



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

Fig. 10. Gravel grading curve 3/4", used in research.

۴-۲- 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 mm (۴-۰) مصرفی تحقیق، به طرح مخلوط مرجع ارائه گردیده است.

۴-۲-۱- اسلامپ طرح‌های مخلوط اولیه

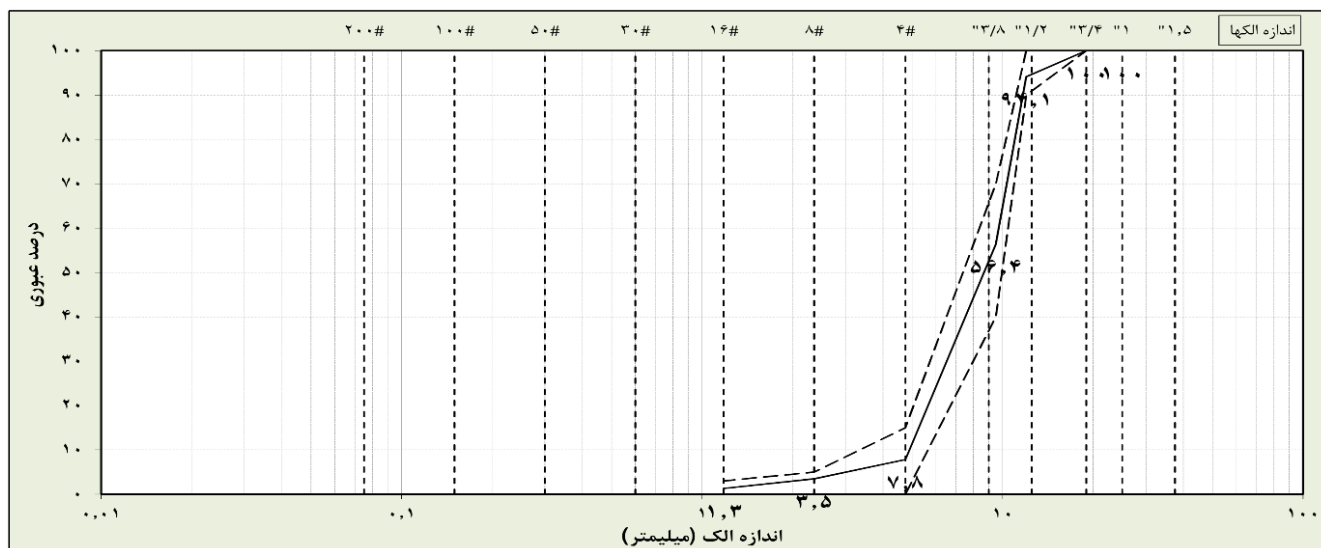
همان‌گونه که در نمودار ۵ مشاهده می‌کنید؛ طرح‌های مخلوط اولیه با نام‌های (SH)1، (SH)2، (SH)3 و (SH)4 نشان داده شده‌اند، طرح‌های مخلوط (SH)1 و (SH)2 نسبت آب به سیمان یکسان و معادل ۰/۴۲ داشتند و در باقی مصالح تشکیل دهنده طرح مخلوط به‌غیر از میزان لیکا mm (۴-۰) مصرفی، یکسان بودند؛ به‌گونه‌ای که لیکا mm (۴-۰)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

۴-۱-۳- 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-C136 و ASTM-D 422، در محدوده تعیین شده قرار دارد و از نظر دانه‌بندی مناسب استفاده در تحقیق می‌باشد.

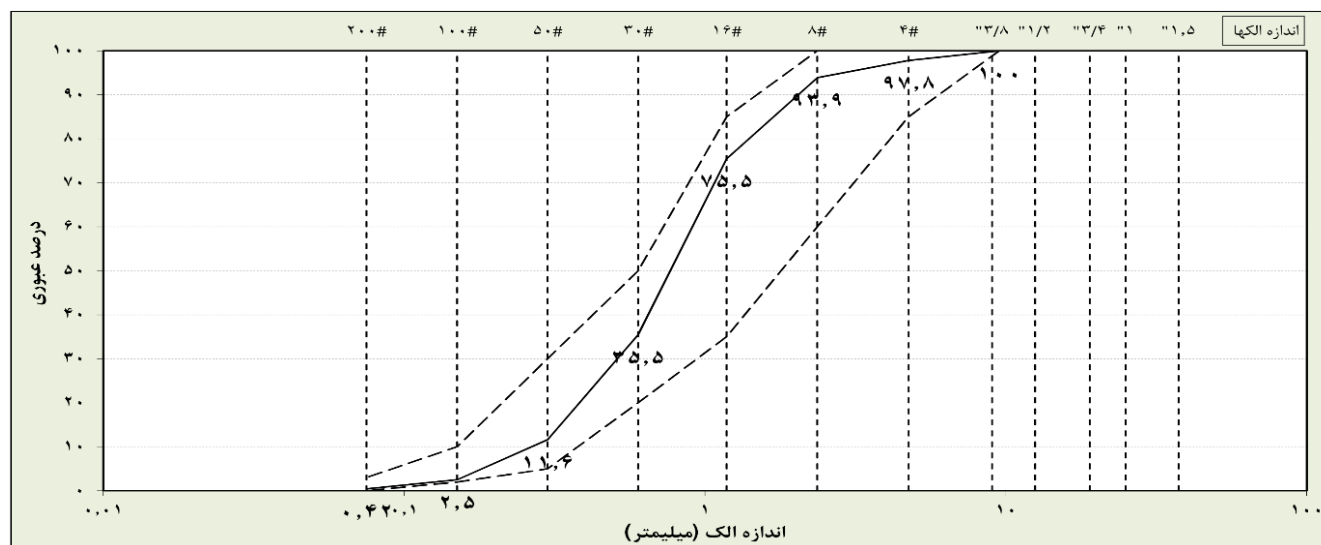
۴-۱-۴- تحلیل نتایج آزمایش دانه‌بندی PET

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 تعیین‌شده 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.



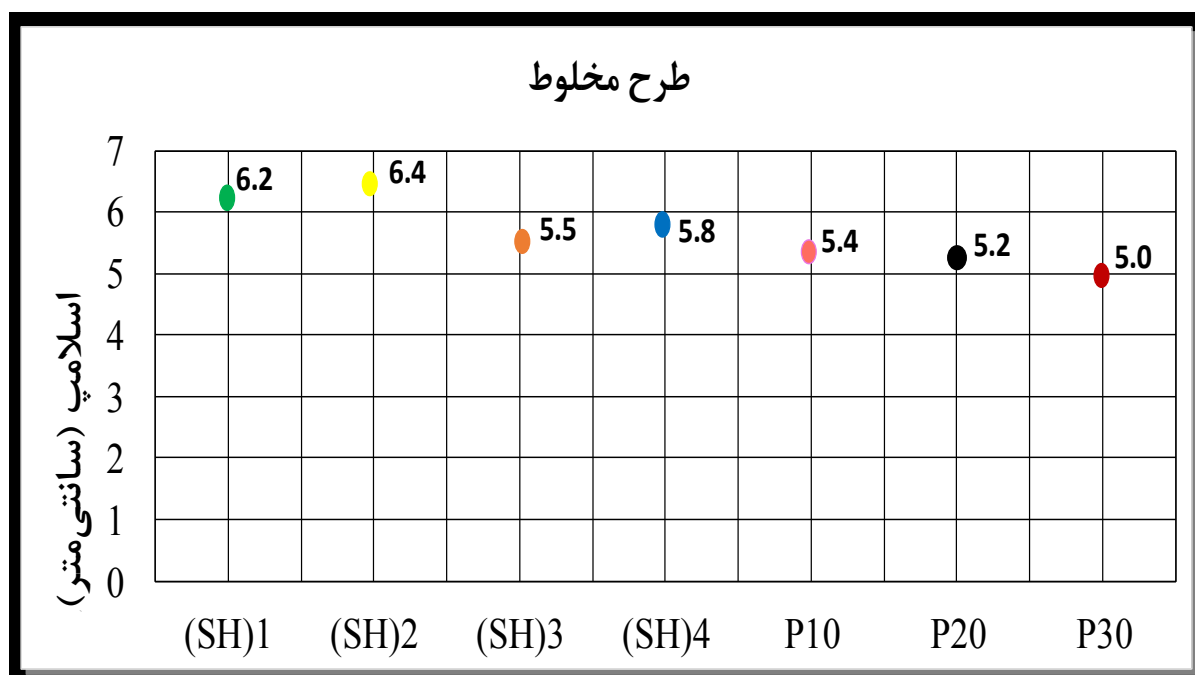
شکل ۱۱. منحنی دانه‌بندی شن ۳/۸"، مصرفی در تحقیق.

Fig. 11. Gravel grading curve 3/8", used in research.



شکل ۱۲. منحنی دانه‌بندی PET، مصرفی در تحقیق

Fig. 12. PET granulation curve, used in research



شکل ۱۳. تغییرات اسلامپ طرح‌های مخلوط تحقیق.

Fig. 13. Slump changes in mixed research designs.

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.

۴-۳- 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.

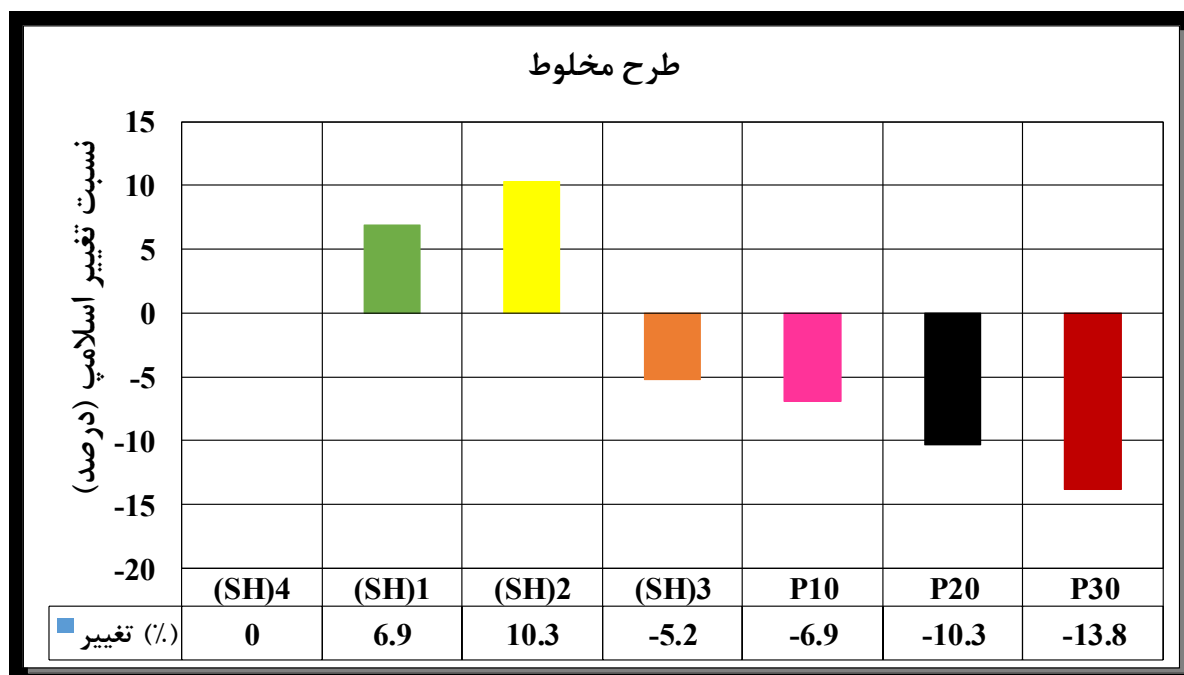
۴-۳-۱- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح مخلوط‌ها اولیه

با توجه به شکل ۱۵، در طرح مخلوط‌ها اولیه همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این طرح‌ها در تمامی مقادیر مصالح مصرفی، به جز مقدار آب و لیکا mm

لیکا mm (۰-۴) مصرفی، یکسان بودند و لیکا mm (۰-۴) 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 mm (۰-۴) 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.

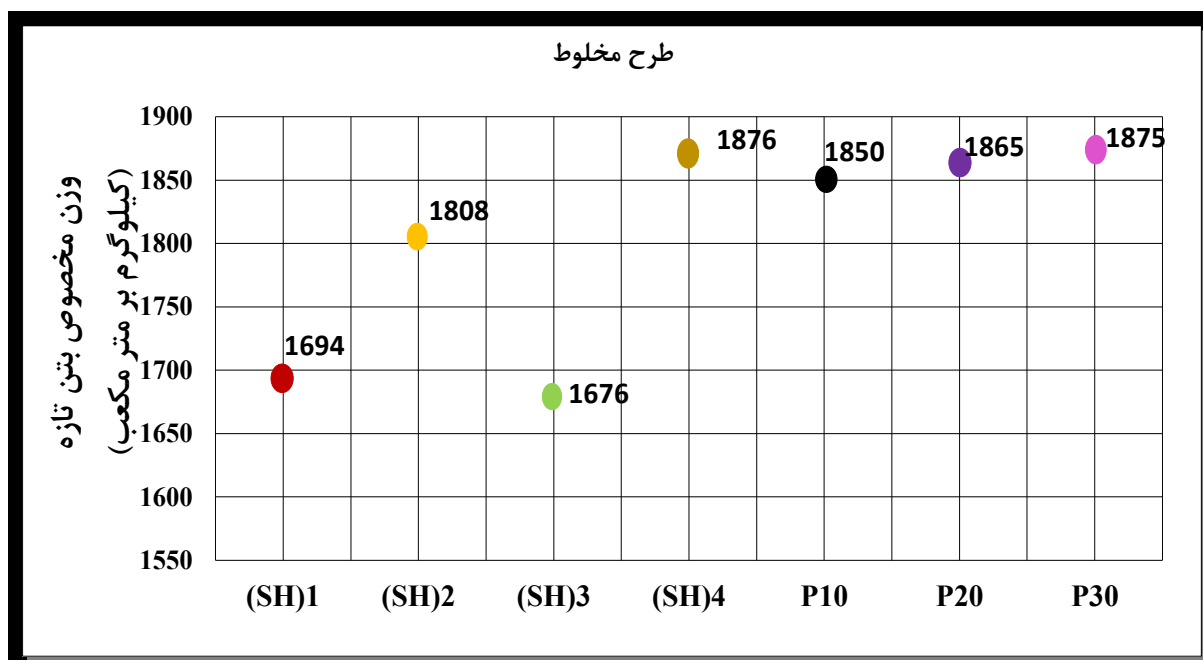
۴-۲-۲- اسلامپ طرح‌های مخلوط حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات

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 mm (۰-۴)، 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 $\frac{6}{13} - \frac{9}{8}$ ، همراه بودند که نشان دهنده این



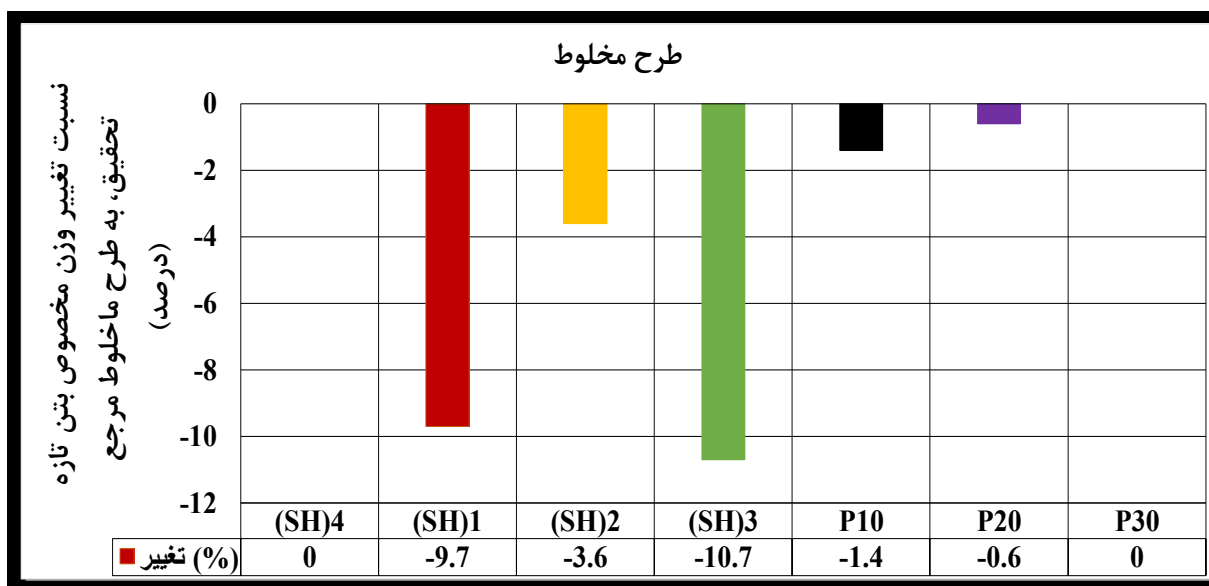
شکل ۱۴. نسبت اسلامپ طرح‌های مخلوط تحقیق به طرح مرجع.

Fig. 14. Slump ratio of mixed research designs to the reference design.



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

Fig. 15. Results and changes in specific gravity of fresh concrete from research mix designs compared to reference mix design.



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

Fig. 16. Ratio of fresh concrete specific gravity of research mix designs compared to reference mix design.

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.

۴-۴-۱- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح‌های مخلوط اولیه

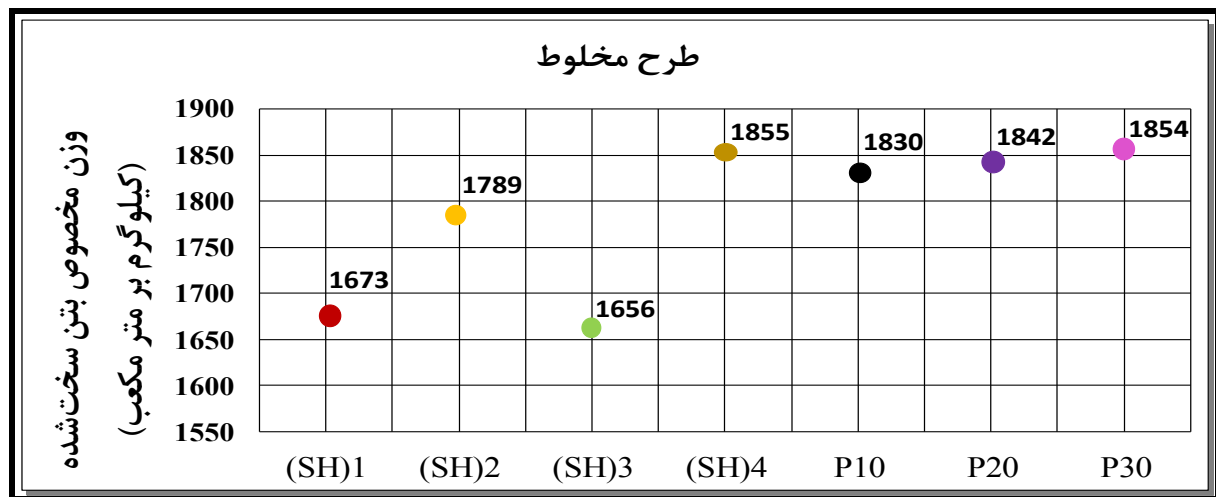
با توجه به شکل ۱۷، پس از سخت‌شدن بتن تولید شده براساس طرح‌های مخلوط اولیه و با توجه به این نکته که این طرح‌ها در تمامی مقادیر مصالح مصرفی، به جز مقدار آب و لیکا (۰-۴) mm، یکسان بودند و مقدار آب و لیکا (۰-۴) mm، در تمامی این طرح‌ها متغیر بوده‌است، نتایج حاصل از آزمایش وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح‌های مخلوط اولیه در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند 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 (۰-۴) mm در آن جایگزین شده است، وزن مخصوص کمتری دارد.

(۰-۴) mm، یکسان بودند. لذا با توجه به متغیر بودن مقدار آب و لیکا (۰-۴) mm، 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.

۴-۳-۲- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح مخلوط‌ها حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

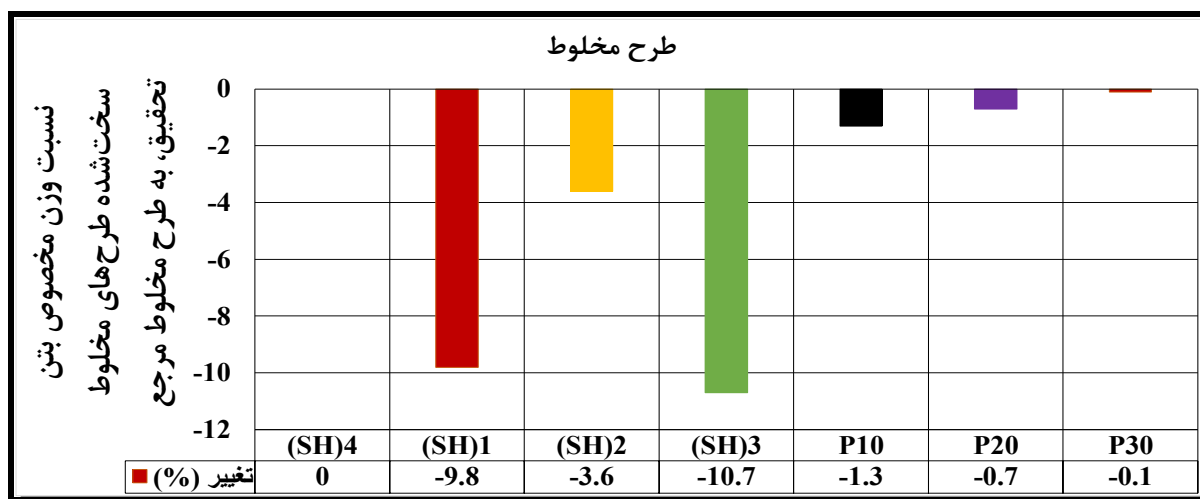
براساس شکل ۱۵، با جایگزینی ۱۰٪ PET با لیکا (۰-۴) mm، وزن مخصوص بتن تازه حاوی PET، از وزن مخصوص بتن تازه مرجع (SH)4، کمتر می‌باشد. اما همان‌طور که در نمودار مشخص است؛ با افزایش درصد جایگزینی PET در بتن با لیکا (۰-۴) mm، وزن مخصوص بتن تازه حاوی PET افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که با جایگزینی ۳۰٪ PET، وزن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

۴-۴-۲- تحلیل نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت‌شده پس از انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح



شکل ۱۷. نتایج و تغییرات وزن مخصوص بتن سخت شده طرح مخلوط‌های تحقیق نسبت به طرح مخلوط مرجع.

Fig. 17. Results and changes in the specific gravity of hardened concrete of the research mix design compared to the reference mix design.

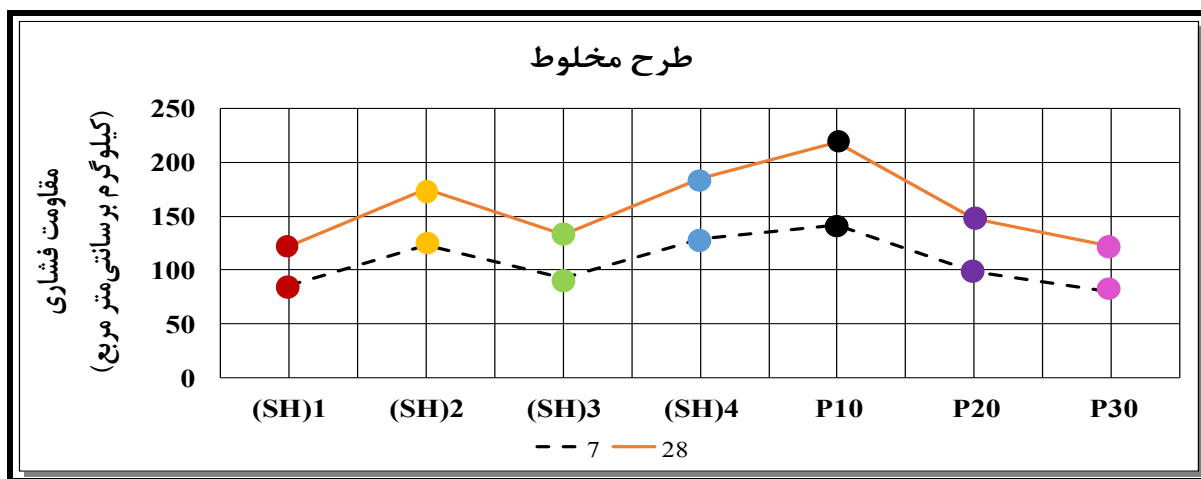


شکل ۱۸. نسبت وزن مخصوص بتن سخت شده طرح‌های مخلوطی تحقیق نسبت به طرح مخلوط مرجع.

Fig. 18. Ratio of specific gravity of hardened concrete of research mix designs compared to reference mix design.

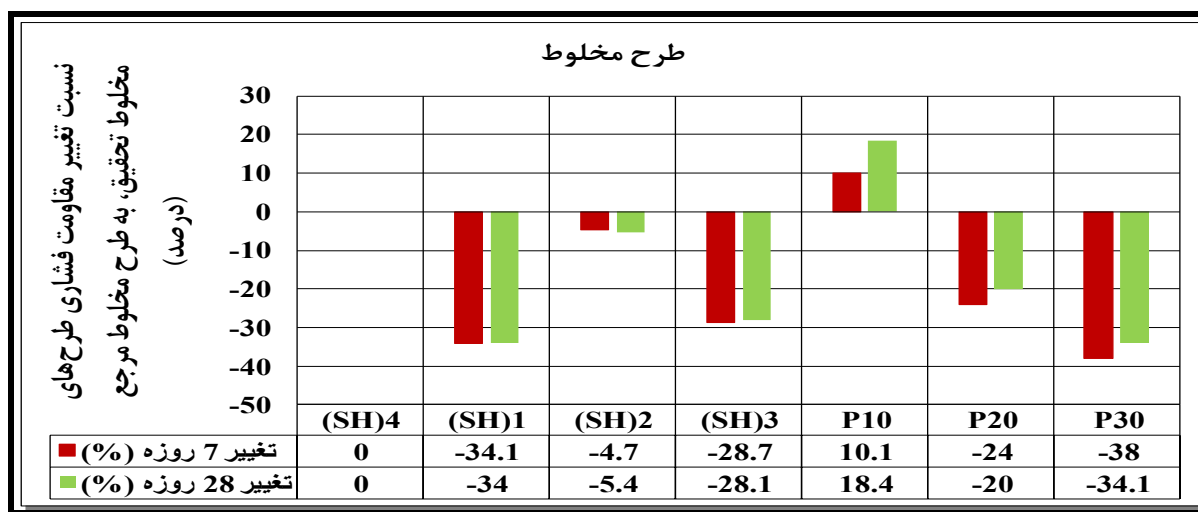
سخت شده مرجع (SH)4، کمتر می‌گردد و با توجه به شکل ۱۷، با افزایش درصد جایگزینی PET به مقدار ۲۰٪ در بتن با لیکا (۰-۴) mm، وزن مخصوص بتن سخت شده حاوی PET افزایش می‌یابد. در این تحقیق، افزایش وزن مخصوص بتن سخت شده تا جایی ادامه می‌یابد که با جایگزینی ۳۰٪ PET، وزن مخصوص بتن سخت شده حاوی PET، با وزن مخصوص بتن سخت شده مرجع (SH)4، تقریباً برابر می‌گردد.

۴-۲- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده طرح مخلوط‌های حاوی پلی اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا براساس شکل ۱۷، نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده حاصل از نمونه‌های تولید شده حاوی PET، نشان می‌دهد که پس از سخت شدن، همانند بتن تازه، با جایگزینی ۱۰٪ PET با لیکا (۰-۴) mm، وزن مخصوص بتن سخت شده حاوی PET، از وزن مخصوص بتن



شکل ۱۹. نتایج و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های تولید شده مطابق با طرح مخلوط‌های تحقیق، براساس سن نمونه‌ها

Fig. 19. Results and changes in compressive strength of specimens produced according to the research mixture design, based on the age of the specimens



شکل ۲۰. نسبت تغییر مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های تحقیق به طرح مخلوط مرجع

Fig. 20. Ratio of change in compressive strength of research mixture design to reference mixture design

۴-۵-۱- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های اولیه

در جهت تولید بتن سبک سازه‌ای به جای ماسه معمولی از سبکدانه لیکا mm (۴-۰) استفاده شد. نکته واضح این است که با استفاده از این سبکدانه، علاوه بر کاهش وزن مخصوص، مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد. حال با توجه به شکل ۱۹ و با توجه به اینکه طرح‌های مخلوط (SH)1 و (SH)2 نسبت آب به سیمان یکسان و معادل ۰/۴۲ داشتند؛ نتایج نشان می‌دهد که

۴-۵-۲- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۱۳ نشان داده شده‌اند. برای بررسی دقیق‌تر، نتایج به‌دست آمده، در شکل ۱۹ ارائه گردیده‌اند. همچنین برای تحلیل بهتر نتایج مقاومت فشاری، نسبت تغییر مقاومت فشاری طرح مخلوط‌ها تحقیق به طرح مخلوط مرجع (SH)4، در شکل ۲۰ ارائه شده‌است.

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.

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.

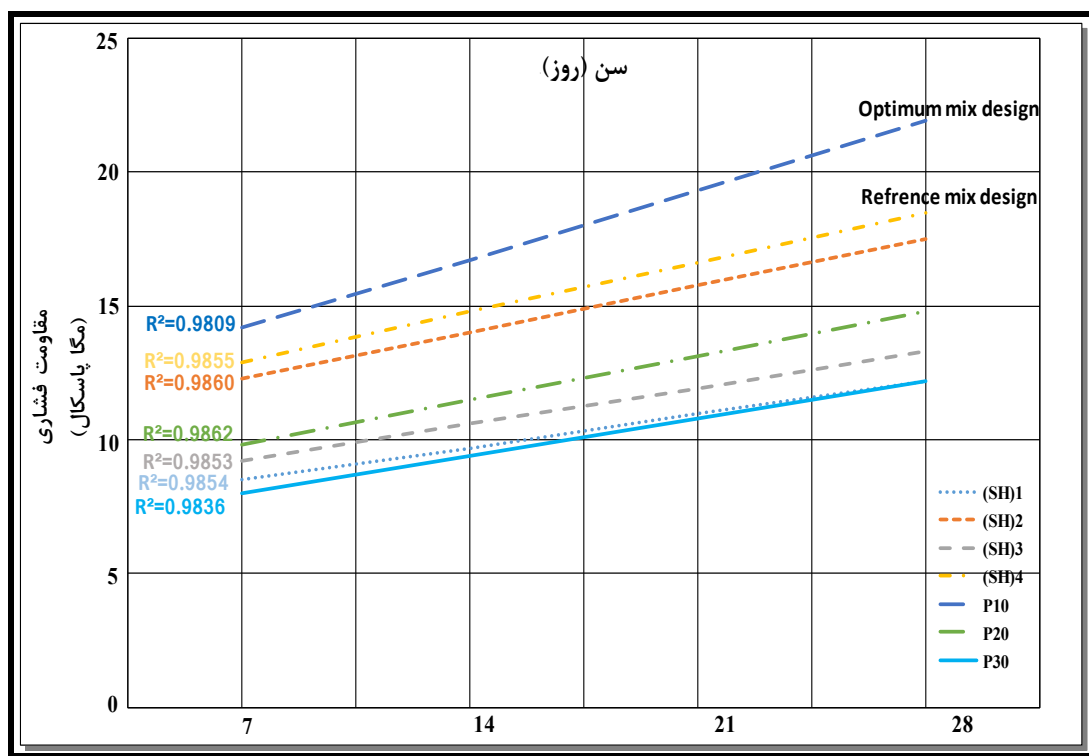
۴-۶-۱- تحلیل نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح مخلوط مرجع

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 ضریب ارتجاعی مبنای آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بر روی نمونه‌های تولید شده براساس طرح مخلوط مرجع (SH)4 انجام پذیرفت و ضریب ارتجاعی استاتیکی به مقدار ۱۶/۵ GPa برای آن ثبت گردید. ضریب ارتجاعی 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 ضریب ارتجاعی استاتیکی، استفاده گردید.

طرح مخلوط 1 (SH) به علت دارا بودن مقدار بیشتر سبکدانه لیکا mm (۴-۰) به میزان ۳ برابر، نسبت به طرح مخلوط 2 (SH)، از مقاومت فشاری کمتری نسبت به طرح مخلوط 2 (SH) برخوردار است. همین نکته در ارتباط با طرح‌های مخلوط 3 (SH) و 4 (SH) نیز صدق می‌کند؛ به گونه‌ای که در طرح‌های مخلوط 3 (SH) و 4 (SH) با وجود اینکه نسبت آب به سیمان یکسان و معادل ۰/۳۵ می‌باشد؛ مقاومت فشاری طرح مخلوط 4 (SH)، به‌علت دارا بودن سبکدانه لیکا mm (۴-۰) کمتر نسبت به طرح مخلوط 3 (SH) 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 می‌باشد که طرح‌های مخلوط 1 (SH) و 3 (SH) و همچنین طرح‌های مخلوط 2 (SH) و 4 (SH) در تمامی مصالح مصرفی به‌غیر از آب؛ از نظر مقدار یکسان بودند؛ به گونه‌ای که نسبت آب به سیمان طرح مخلوط 1 (SH) بیشتر از نسبت آب به سیمان طرح مخلوط 3 (SH) و نسبت آب به سیمان طرح مخلوط 2 (SH) بیشتر از نسبت آب به سیمان طرح مخلوط 4 (SH) بود؛ و نتایج نیز نشان می‌دهد که طرح مخلوط 4 (SH) نسبت به طرح مخلوط 2 (SH) و طرح مخلوط 3 (SH) نسبت به طرح مخلوط 1 (SH) از مقاومت فشاری بیشتری برخوردار هستند که نشان می‌دهد کاهش نسبت آب به سیمان در طرح‌های مخلوط، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد.

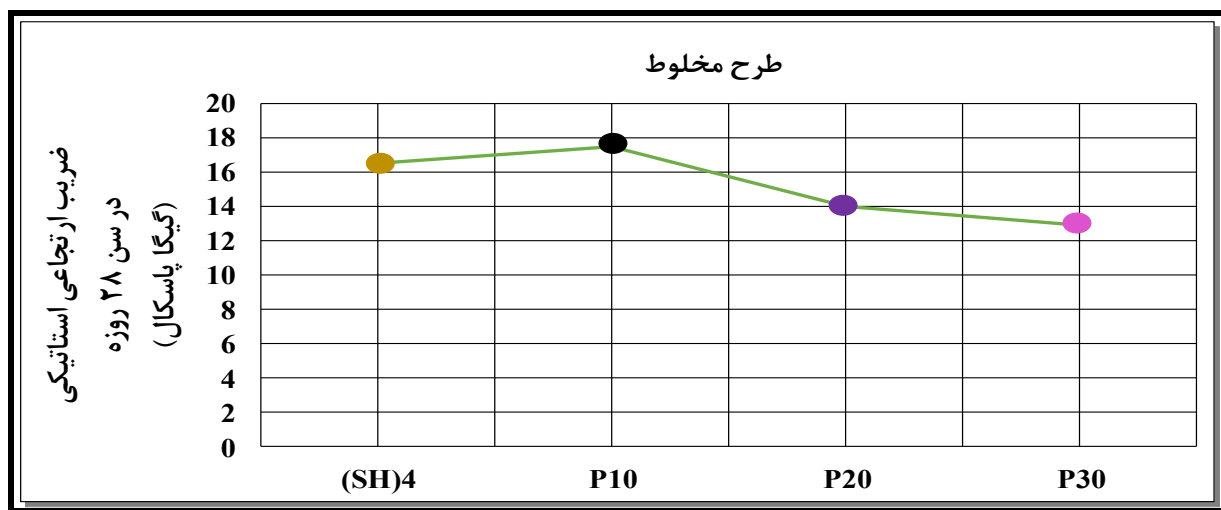
۴-۵-۲- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۱۹ در طرح مخلوط P10، با افزایش مقدار PET به میزان ۱۰٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4 (PET)، جایگزین لیکا mm (۴-۰)، 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 (SH)4، مقاومت فشاری بیشتری کسب نمود. اما نتایج نمودار شکل ۱۹ نشان می‌دهد در طرح مخلوط P20، که مقدار PET مصرفی در تحقیق ۲۰٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع، افزایش یافته‌است، 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)4، 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)4، بودیم با این تفاوت که این کاهش مقاومت



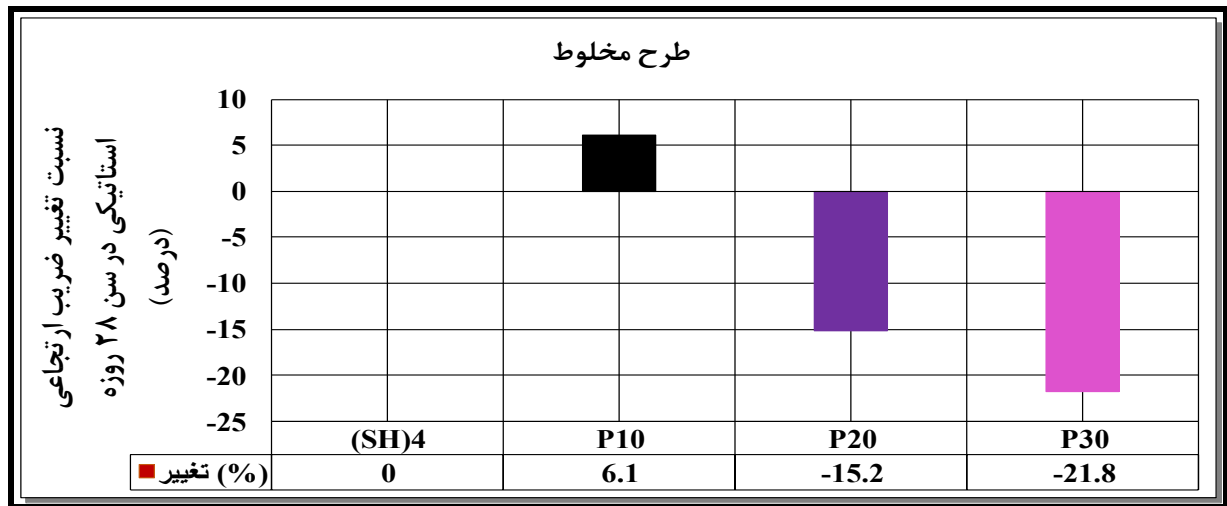
شکل ۲۱. رشد مقاومت فشاری با سن نمونه‌های تولیدشده در طرح‌های مخلوط مختلف تحقیق

Fig. 21. Growth of compressive strength with age of specimens produced in different research mixture designs



شکل ۲۲. نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های مخلوط تحقیق در سن ۲۸ روزه

Fig. 22. Results of static elastic modulus of research mixed designs at 28 days of age



شکل ۲۳. نسبت ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های مخلوط تحقیق به طرح مخلوط مرجع

Fig. 23. Ratio of static elastic modulus of research mixture designs to reference mixture design

۴-۶-۲- تحلیل نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح مخلوط‌های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

نمونه‌های تولید شده بر اساس طرح‌های مخلوط حاوی PET جایگزین لیکا (۴-۰) mm، تحت آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی قرار گرفتند و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بر مبنای نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی 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٪، جایگزین لیکا (۴-۰) mm، نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، ضریب ارتجاعی 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 (SH)4، ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه دچار افت ناگهانی شده و به میزان ۱۵/۲٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، 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٪، جایگزین لیکا (۴-۰) mm، نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه، مجدداً نسبت به ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح مخلوط مرجع (SH)4، دچار افت ناگهانی شده و با کاهش شدید، ضریب ارتجاعی استاتیکی به میزان ۲۱/۸٪، نسبت به طرح

مخلوط مرجع (SH)4، کاهش یافت.

۵- جمع‌بندی

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 سخت‌شده 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 (SH)2 و (SH)4 وجود دارد که طرح مخلوط (SH)4 از خواص مکانیکی برتری نسبت به طرح مخلوط (SH)2 برخوردار است.

۵-۲- نتایج طرح مخلوط‌های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات جایگزین لیکا

- با جایگزینی PET به میزان ۱۰٪ با سبکدانه لیکا اسلامپ طرح مخلوط‌های حاوی PET نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، کاهش یافت.
- با افزایش نسبت جایگزینی PET با سبکدانه لیکا، روند کاهشی اسلامپ طرح مخلوط‌های حاوی PET نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، ادامه یافت.

- 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

منابع

- [1] M. Rafiee, Porous Concrete Production Technology, Barakat Maryam Publications, (2019).
- [2] T. Ganiron, Effect of sawdust as fine aggregate in concrete mixture for building construction, International Journal of Advanced Science and Technology, 63(1) (2014) 73–82.
- [3] W. Zhao, The implementation of new building materials in our country [J], The word garden, 4 (2013) 20.
- [4] M. Mageswari, B. Vidivelli, The use of sawdust ash as fine aggregate replacement in concrete, J. Environ. Res. Dev, 3(3) (2009) 720–726.
- [5] A. Nowell, H. Translation: Famili, Concrete science (properties of concrete), Tehran, Iran University of Science and Technology, (2012).
- [6] A. Anvari, AAC lightweight concrete and its application in the construction industry, Kotob daneshgahi publication, (2010).
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A. Hillerborg, L. Elfgren, S.P. Shah, Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics, Proceeding of International RILEM Workshop, (1989).

- در طرح مخلوط P10، با جایگزینی مقدار PET به میزان ۱۰٪ با سبکدانه لیکا نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، 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 ٪، 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 (SH)4، 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 (SH)4، 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 (SH)4، افت کرد.
- در طرح مخلوط P10، جایگزینی مقدار PET با لیکا به میزان ۱۰٪، نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، 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 (SH)4، سبب شد که ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه به میزان ۱۵/۲٪ نسبت به طرح مخلوط مرجع (SH)4، 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 (SH)4، به میزان ۲۱/۸٪، افت کند.

۵-۳- 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

- 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, 3320, *Polymers*, 15 (2023) 3320.
- [28] A.O. Dawood, A.-K. Hayder, R.S. Falihi, 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.
- [10] J. Berenjian, E. Faghieh Maleki, S. Khoshnevisan, Study of effective parameters on concrete slabs, in: *Fifth Annual National Conference of Iranian Concrete*, 2013.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] S. Hınıslıoğlu, E. Ağar, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials letters*, 58(3-4) (2004) 267–271.
- [15] 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 (2017) 937–944.
- [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

- C150-07, (2007).
- [39] T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Portland cement – properties, Standard No. 389, (2020).
- [40] S. ASTM, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, C136-06, (2006).
- [41] 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) (2008).
- [42] 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.
- [43] S. ASTM, Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete, C1602, (2022).
- [44] A.c. 211, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, ACI Man. Concr. Pract, (1991) 1–91.
- [45] A.c. 304, Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete, ACI Man. Concr. Pract, (2000).
- [46] S. ASTM, Standard practice for making and curing concrete test specimens in laboratory, C192/C192M, (2007).
- [47] S. ASTM, Standard test method for particle-size analysis of soils, D422, (2002).
- [48] T.A.O.f.S. Development, General Technical Specifications for Construction Works (Publication 55), Planning and Budget Organization Publications, (2009).
- [49] S. ASTM, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, C138/C138M, (2001).
- [50] 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, (2019).
- [51] T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Hardened concrete - Density, water absorption and voids - Test method, Standard No. 15427, (2017).
- [52] T.C.f.S.D.o.t.N.S.O.o. Iran, Hardened Concrete -
- [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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, Waste management, 30(6) (2010) 1101–1106.
- [36] 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.
- [37] S. ASTM, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, C127-07, (2007).
- [38] S. ASTM, Standard Specification for Portland Cement,

- [56] 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, (2016).
- [57] S. ASTM, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, C617, (1998).
- [58] 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.
- [59] 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.
- Determination of Compressive Strength of Test Samples, Standard No. 1608-3, (2014).
- [53] 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(2002).
- [54] 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, (2014).
- [55] 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. 581, (2014).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. F. Sajedi , A. Lefte Naami , *Feasibility study of lightweight structural concrete using LECA and PET and determination of its mechanical properties*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 58(3) (2026) 299-334.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23689.8198](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23689.8198)

