Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 1), 2021, pp. 42-57

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

EFFECTS of DIFFERENT TYPES OF RECYCLED POLYMER AGGREGATES on MECHANICAL PROPERTIES of CONCRETE

Pouria Drzekanani [1], Sadegh Dardaei [2*]

1- MSc. Student, Faculty of Science and Technologies, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Faculty of Science and Technologies, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Plastic waste control has always been a major concern in many countries. The amount of these substances increases every year due to continued public consumption. Given the high cost of plastic recycling in developing countries, returning these materials to the industry for the production of building materials can be a viable solution to protect the environment. Since concrete is one of the most widely used composite materials in the building industry, it, therefore, provides a suitable base for the utilization of plastic waste. In this research, different plastic granules are replaced with a certain amount of fine natural aggregates, and the physical and mechanical properties of the concrete made from these materials are evaluated by necessary tests. The target plastics are Polypropylene, High Impact Polystyrene, and Polyethylene terephthalate. The size and aggregation of the mentioned fine plastic particles are similar, replacing the sand with 15% and 30% by weight. The results show that the mechanical properties of the concrete decrease as the amount of substituted plastic aggregates increases. However, among the concrete made with plastic aggregates, the one which contains High Impact Polystyrene, has the best performance. In addition, the workability of the concrete was improved by increasing the amount of plastic aggregate present in the concrete. However, in the concrete containing Polyethylene terephthalate, this index declined. Also, among the physical and mechanical properties of concrete, flexural strength and ultrasonic pulse velocity of concrete were the most varied, but the compressive and tensile strength and workability have undergone fewer changes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 February 2020
Revise Date: 28 April 2020
Accept Date: 29 April 2020

Keywords:
Plastic aggregate
Compressive strength
Tensile strength
Flexural strength
Ultrasonic pulse velocity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.218146.2064

*Corresponding author: Sadegh Dardaei
Email address: dardaei@modares.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی آزمایشگاهی تاثیر انواع سنگدانه های پلیمری بازیافتی بر مشخصات مکانیکی بتن

پوریا درزه کنانی[۱]، صادق دردائی[۲*]

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی ساختمان‌های هوشمند، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲ - استادیار دانشکده علوم و فناوریهای بین رشته ای، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

کنترل ضایعات پلاستیکی همواره از دغدغه های اساسی کشورهای مختلف بوده است و هر ساله میزان این مواد با توجه به مصرف مداوم عمومی افزایش می یابد. با توجه به هزینه های بازیافت در کشورهای در حال توسعه، بازگرداندن این مواد به صنعت، به جهت تولید مصالح ساختمانی، می تواند راهکاری مناسب در جهت حفظ محیط زیست می باشد. از آن جایی که بتن یکی از پرمصرف ترین مواد کامپوزیت در صنعت ساختمان می باشد، بنابراین بستری مناسب برای بهره مندی از ضایعات پلاستیکی فراهم می سازد. در این پژوهش، سنگدانه های پلاستیکی مختلف، با میزان مشخصی از ریزدانه های طبیعی، جایگزین می شوند و خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ساخته شده از این مواد، به وسیله آزمایش های لازم ارزیابی می گردد. پلاستیک های مورد نظر، پلی پروپیلن، پلی استایرن مقاوم و پلی اتیلن ترفتالات می‌باشد. ابعاد و دانه بندی ریزدانه های پلاستیکی اشاره شده، مشابه یکدیگر می باشند که به میزان ۱۵٪ و ۳۰٪ وزنی، جایگزین ریزدانه ها می گردند. نتایج نشان می دهند که با افزایش میزان سنگدانه های جایگزین شده، مشخصات مکانیکی بتن دچار اندکی دچار افت می‌شود. این در حالی است که در میان بتن هایی که با سنگدانه های پلاستیکی ساخته شده اند، بتن حاوی پلی استایرن مقاوم، دارای بهترین عملکرد می باشد. علاوه بر این با افزایش میزان حضور سنگدانه های پلاستیکی، کارایی بتن بهبود یافت. این در حالی است که در بتن حاوی پلی اتیلن ترفتالات، کارایی بتن کاهش یافت. همچنین در میان مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن، مقاومت خمشی و سرعت پالس التراسونیک بتن، دچار بیشترین تغییرات شدند، اما مقاومت فشاری، مقاومت کششی و کارایی بتن، دستخوش تغییرات کمتری شدند.

کلمات کلیدی: سنگدانه پلاستیکی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، سرعت پالس التراسونیک.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۸/۱۱/۱۲	۱۳۹۹/۰۲/۰۹	۱۳۹۹/۰۲/۱۰	۱۳۹۹/۰۲/۱۰	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.218146.2064
					doi: 10.22065/jsce.2020.218146.2064

*نویسنده مسئول: صادق دردائی

پست الکترونیکی: dardaei@modares.ac.ir

۱- مقدمه

کنترل ضایعات پلاستیکی همواره از دغدغه های اساسی کشورهای مختلف در سراسر دنیا بوده است و میزان این مواد با توجه به مصرف مداوم عمومی، هر ساله در حال افزایش است و نقش بزرگی را در آلودگی محیط زیست ایفا می کنند. از آن جایی که بیشتر حجم بتن توسط سنگدانه های طبیعی در بر گرفته شده است و خصوصیات مهم بتن از این مواد نشأت می گیرد، برای کشور هایی که روش مناسبی برای انجام فرایند های بازیافت ندارند، استفاده مجدد ضایعات پلاستیک در تولید بتن های سبک تر، می تواند بهترین راه حل باشد. به گونه ای که ضایعات پلاستیکی به عنوان سنگدانه های مصنوعی و سبک، جایگزین سنگدانه های طبیعی شن یا ماسه می گردند. با این رویکرد، بتن ساخته شده از این مواد علاوه بر حفظ محیط زیست، با توجه به وزن سبک، دارای مشخصات و مزایای برتری نیز می باشد. این شاخصه ها موجب افزایش علاقه محققین به مطالعه در رابطه با این زمینه شد و مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن حاوی ضایعات پلاستیکی جایگزین شده، با انجام مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده به سه دسته بتن حاوی PET (پلی اتیلن ترفتالات)، PVC (پلی وینیل کلراید) و مواد دیگر پلاستیکی تقسیم می شود. به عنوان نمونه در سال ۲۰۱۰ در مطالعه ای به جایگزینی ۵٪ وزنی ریزدانه های طبیعی با سنگدانه های PET حاصل از ضایعات پرداخته شد [۱]. در ادامه در سال ۲۰۱۲ نیز دو پژوهش صورت گرفت که در آن ها تأثیر ابعاد و شکل سنگدانه های پلاستیکی بر ویژگی های بتن مورد بررسی قرار گرفت [۲ و ۳]. همچنین در همین سال در پژوهشی دیگر، تأثیر جایگزینی ضایعات پلاستیکی بر روی هدایت گرمایی بتن بررسی شد [۴]. در سال ۲۰۱۳، تحقیقی دیگر بررسی های دقیق تر و جامع تری بر روی مشخصات بتن حاوی سنگدانه های پلاستیکی جایگزین شده انجام گرفت [۵]. برای اولین بار در سال ۲۰۱۵، تأثیر ضایعات PET به عنوان جایگزین سنگدانه های درشت طبیعی بتن مورد مطالعه قرار گرفت [۶] و به طور گسترده تر در همین سال تأثیر هم زمان جایگزینی ریزدانه و درشت دانه های PET بر روی خواص مرتبط با مقاومت بتن انجام گرفت [۷]، با این تفاوت که درصد وزنی مشخصی از حجم شن و ماسه به طور هم زمان جای خود را به ترتیب به درشت دانه و ریزدانه PET می دهند. در دسته دیگر تحقیقات انجام شده، در رابطه با استفاده از PVC به عنوان سنگدانه پلاستیکی جایگزین شونده، در سال ۲۰۱۴، تأثیر هم زمان جایگزینی سنگدانه های ریز و متوسط PVC حاصل از لوله های PVC بر مشخصات مکانیکی بتن صورت گرفت [۸]. در سال ۲۰۱۸، مطالعه کامل تری در ارتباط با این موضوع و استفاده از سنگدانه PVC صورت گرفت [۹]. در این مطالعه علاوه بر بررسی تأثیر جایگزینی ریزدانه و درشت دانه های PVC به طور جداگانه، درصد های جایگزینی مختلفی از ۵٪ تا ۸۵٪ انتخاب شد. در دسته سوم تحقیقات انجام شده، مواد پلاستیکی دیگری نیز در چند سال گذشته به عنوان مواد جایگزینی انتخاب شده اند و مشخصات بتن حاوی این مواد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به طور مثال در سال ۲۰۱۵، مطالعه ای تحت عنوان خواص بتن های سبک خود متراکم حاوی ذرات پلاستیک بازیافت شده انجام شد [۱۰]. در این مطالعه از پلاستیک های PP (پلی پروپیلن) بازیافتی استفاده شد. به همین ترتیب از همین ماده نیز در سال ۲۰۱۶ به جهت بررسی تأثیر جایگزینی آن بر روی مشخصات بتن به کار گرفته شد [۱۱]. با این تفاوت که از درشت دانه های PP استفاده شد. در مطالعه پیش رو، بر خلاف تحقیقات قبل، مشخصات فیزیکی و مکانیکی شش دسته بتن حاوی سه نوع سنگدانه پلیمری شامل سنگدانه های پلاستیکی ضایعاتی PP، PET و HIPS (پلی استایرن مقاوم) با درصد های جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد به‌جای ریزدانه، در شرایط یکسان بررسی می شود. سپس با مقایسه نتایج بدست آمده، مشخص می‌شود که استفاده از کدام نوع سنگدانه پلیمری براساس چه عواملی، در جایگزینی ریزدانه‌های طبیعی بتن مناسب‌تر می‌باشد.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

بتن اساساً از سنگدانه ها، سیمان، آب، هوا و مواد افزودنی تشکیل شده است. بتن ساخته شده در این پژوهش، فاقد هر گونه مواد افزودنی[1] می باشد. سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق، سنگدانه های طبیعی و مصنوعی هستند که سنگدانه های طبیعی شامل شن

[1] Admixtures

بادامی، شن نخودی و ماسه مطابق شکل ۱ و سنگدانه های مصنوعی مطابق شکل ۲، شامل سنگدانه های پلاستیکی ضایعاتی PP، PET و HIPS می باشند.

شکل ۱: سنگدانه های طبیعی؛ الف) شن بادامی ب) شن نخودی پ) ماسه

شکل ۲: سنگدانه های پلاستیکی؛ الف) PET ب) HIPS پ) PP

- **سیمان**

در این پژوهش، از سیمان تیپ دو فیروزکوه در ساخت بتن به کار گرفته شده است. مشخصات فیزیکی سیمان شامل نرمی، زمان گیرش اولیه و نهایی، سلامت و مقاومت فشاری سه و هفت روزه و همچنین مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی از جمله عناصر تشکیل دهنده و اکسید های به کار رفته در تولید آن طبق مرجع شماره [۱۲] بوده و محدودیت های الزامی سازمان ملی استاندارد ایران، به شماره ۳۸۹ مدنظر قرار گرفته است [۱۳].

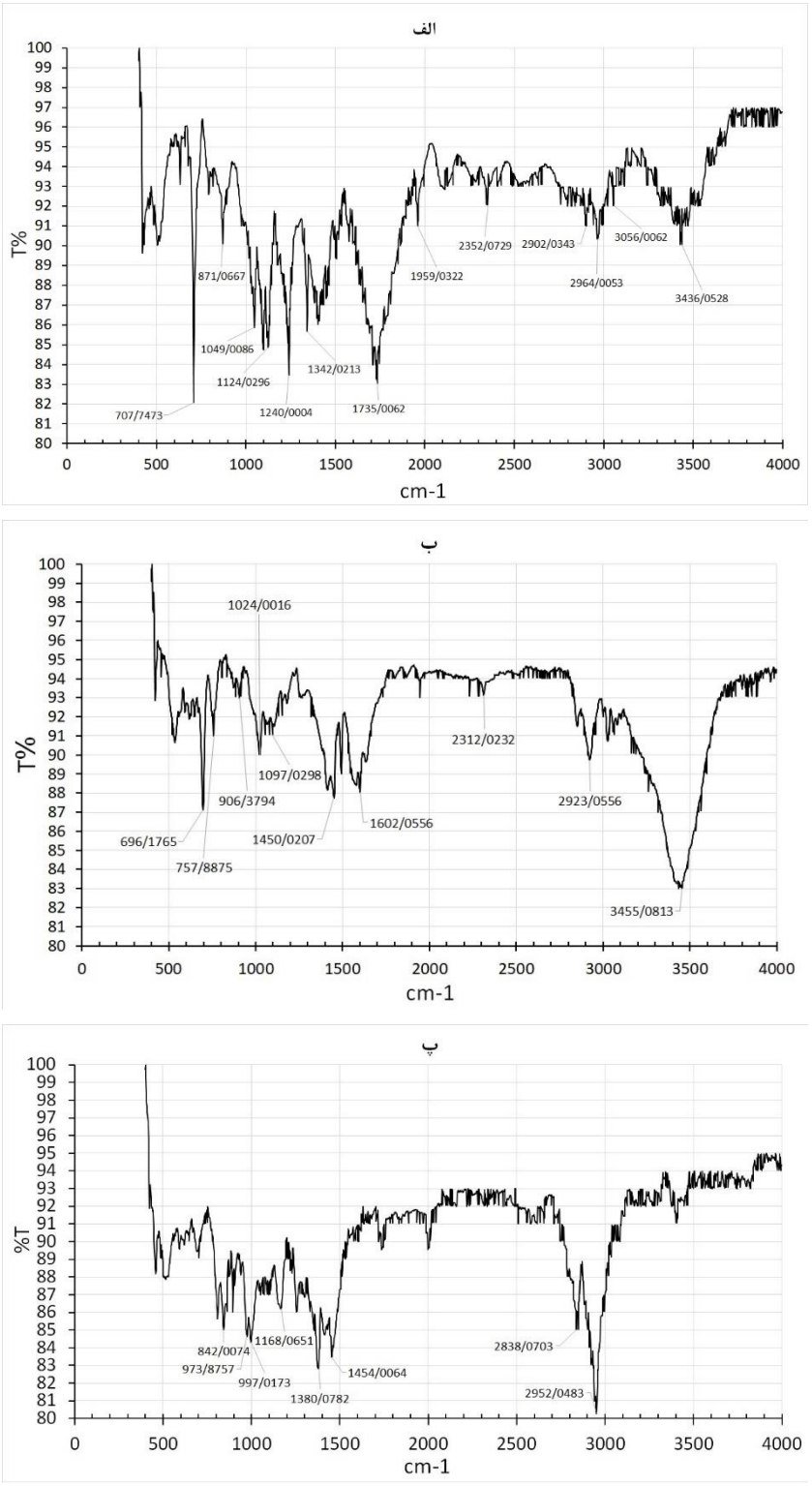
- **سنگدانه های طبیعی**

ریزدانه های مصرفی بدست آمده از ماسه های رودخانه ای، دارای دانه های گرد است که این نوع شکل ظاهری در اثر فرسایش در طبیعت صورت گرفته است. این در حالی است که درشت دانه های مصرفی دارای دانه های نامنظم و گوشه دار می باشد که این نوع دانه ها، شکل هندسی مشخصی نداشته و دارای گوشه های مشخص و تیز هستند. شن بادامی و نخودی که شن های مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل های الف-۱ و ب-۱ می باشد، نتیجه دانه بندی سنگ هایی هستند که در کارخانه به وسیله دستگاه های سنگ شکن خرد شده اند. درشت دانه های به کار رفته در ساخت بتن در این مطالعه، دارای ۶۵٪ شن بادامی و ۳۵٪ شن نخودی می باشند. حداکثر اندازه اسمی درشت دانه ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

- **سنگدانه های پلاستیکی**

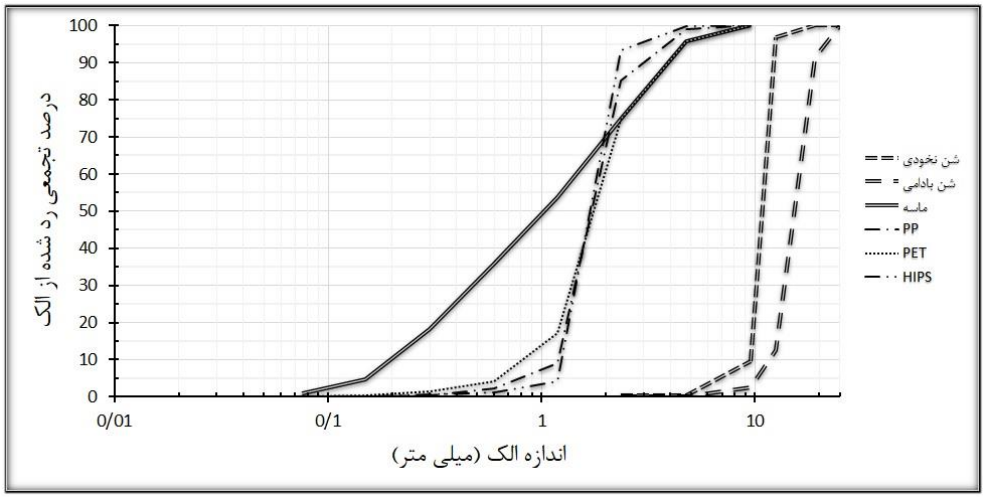
همانطورکه عنوان شد در این پژوهش از سه دسته سنگدانه های پلاستیکی PET، HIPS و PP در ساخت بتن استفاده شده است. شناسایی این مواد مطابق شکل ۳، به کمک آنالیز طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه مطابق استاندارد ASTM D5477 در آزمایشگاه صورت گرفته است. اساس کار این آنالیز، جذب نور مادون قرمز توسط پیوند های شیمیایی است [۱۴]. به این منظور، نور مادون قرمز سفید (با طول موج های متفاوت) توسط یک منبع نور بدون وجود نمونه با عبور دادن از چند آینه به یک آشکارساز تابیده می شود. سپس شدت هر طول موج، بدون نمونه توسط آشکارساز اندازه گیری می شود و تحت مقدار ۱۰۰٪ ثبت می گردد. در مرحله بعد، نمونه درون

محفظه قرار گرفته و پرتو مادون قرمز با هر طول موج به کامپیوتر ارسال می شود و مقدار آن تقسیم بر مقدار پرتو با همان طول موج بدون نمونه می شود. از نمودار بدست آمده از این طول موج ها و بررسی نقاط پیک منحنی ها، ملاحظه شد که سنگدانه های پلاستیکی مصرفی واقعی می باشند.



شکل ۳: طیف عبوری سنگدانه های پلاستیکی؛ الف) PET ب) HIPS پ) PP

از آنجایی که هدف اصلی این تحقیق، جایگزینی ماسه با سنگدانه های پلاستیکی می باشد، بنابراین معیاری برای ابعاد مناسب سنگدانه های پلاستیکی در نظر گرفته شده است تا منحنی دانه بندی این مواد، علاوه بر این که در محدوده ماسه قرار گیرند، بلکه خطوط منحنی آن ها بر منحنی دانه بندی ماسه منطبق شود. با توجه به ابعاد و بررسی دانه بندی PET تهیه شده طبق شکل الف-۲، مشخص شد که منحنی دانه بندی این ماده مطابق شکل ۴، مشابه ماسه است. علاوه بر این با توجه به شکل ب-۲، ملاحظه می شود که HIPS بدست آمده درشت دانه می باشد، بنابراین به جهت انطباق بر منحنی دانه بندی ماسه، مطابق شکل ۴، از دستگاه آسیاب شمشیری برای انجام این کار استفاده شد. علاوه براین، در ارتباط با سنگدانه های پلاستیکی PP، مطابق شکل پ-۲، برای دستیابی به ابعاد دانه بندی مشابه ماسه، سنگدانه های درشت PP، به کمک الک های استاندارد نمره ۴ و ۸ جداسازی شده است. بنابراین با بررسی منحنی دانه بندی مواد عبوری از الک، مطابق شکل ۴، ملاحظه می شود که منحنی دانه بندی PP مشابه ماسه شده است. در تمامی سنگدانه های مصرفی، الزامات دانه بندی استاندارد ASTM C136 رعایت شده است [۱۵].



شکل ۴: منحنی دانه بندی کلیه مصالح سنگی

در این پژوهش، سنجش مدول نرمی ریزدانه های طبیعی و پلاستیکی، به کمک روش شستشوی سنگدانه ها بر روی الک نمره ۲۰۰ مطابق استاندارد ASTM C117 صورت گرفته است [۱۶] که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات وزنی مصالح، از جمله وزن مخصوص، چگالی توده‌ای (میله نخورده) و چگالی توده‌ای میله خورده برای سیمان، شن بادامی، شن نخودی، ماسه، PET، HIPS و PP مطابق استاندارد های ASTM C29,127,128,188 اندازه گیری شده اند [۱۷و۱۸و۱۹و۲۰] و نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱: مدول نرمی مصالح ریزدانه

مصالح	مدول نرمی (٪)
ماسه	۳/۵
PET	۵/۰۷
HIPS	۵
PP	۵/۰۴

جدول ۲: مشخصات وزنی مصالح

ردیف	مصالح	وزن مخصوص	چگالی توده ای (kg/m^3)	چگالی توده ای میله خورده(kg/m^3)
۱	سیمان	۳/۱۴	-	-
۲	شن بادامی	۲/۶۳	۱۳۶۸	۱۴۷۹
۳	شن نخودی	۲/۶۶	۱۳۷۳	۱۴۸۸
۴	ماسه	۲/۶۸	۱۵۶۰	۱۶۹۱
۵	PET	۱/۳۴	۵۰۱	۵۹۲
۶	HIPS	۱/۰۸	۵۲۰	۵۷۱
۷	PP	۰/۹۵	۴۲۶	۴۶۸

- متغیر های آزمایش

به منظور طبقه بندی طرح های اختلاط و نمونه های آماده شده برای هر یک از آزمایش های مورد نظر، بهتر است که هر یک از طرح ها و نمونه ها، به صورت اختصار با کد نوشته شوند. برای طرح اختلاط بتن معیار، از حرف C استفاده می شود. برای سایر طرح های مدنظر که در آن ها، سنگدانه های پلاستیکی جایگزین درصدی از حجم ماسه شده اند، در ابتدا ماده پلیمری و سپس در کنار آن میزان درصد جایگزینی ذکر شده است. به طور مثال کد طرح PET30%، به این معناست که در طرح اختلاط مورد نظر، سنگدانه پلیمری جایگزین شونده PET می باشد که میزان درصد حجمی جایگزینی آن با ماسه، ۳۰٪ است.

- طرح اختلاط بتن

در این پژوهش طرح اختلاط بتن مطابق روش ACI 211.1-91 صورت گرفته است [۲۱] و در ابتدا چندین طرح به عنوان نمونه آزمایشگاهی ساخته شد و با اصلاح مقادیر و نسبت های مصالح به کار گرفته شده، با در نظر گرفتن ثابت بودن مقدار درشت دانه مصرفی، نسبت آب به سیمان ۰/۶۱ و مقاومت فشاری مشخصه ۲۵ مگاپاسکال برای تمامی طرح ها، بهینه ترین ترکیب مطابق جدول ۳، حاصل شده است.

جدول ۳: وزن مصالح مصرفی تشکیل دهنده طرح اختلاط بتن

ردیف	کد طرح	سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	سنگدانه پلیمری (kg/m^3)
۱	C		۱۰۷۵/۲۴	۸۱۷/۸۷		-
۲	PET15%		۹۰۸/۵	۸۱۶/۱۵		۱۳۰/۴۱
۳	PET30%		۷۴۹/۵۳	۸۱۵/۸۳		۲۶۰/۸۲
۴	HIPS15%	۳۵۵/۳۹	۹۰۶/۸۸	۸۱۵/۴۲	۲۱۶/۷۹	۹۸/۲۸
۵	HIPS30%		۷۴۶/۶۲	۸۱۵/۴		۱۹۶/۵۶
۶	PP15%		۹۰۵/۴۳	۸۱۵/۱۸		۸۹/۴
۷	PP30%		۷۴۵/۴۳	۸۱۵/۱۸		۱۷۸/۸

با توجه به جدول ۳، هفت دسته طرح اختلاط بتن جهت ساخت در نظر گرفته شده است. یک طرح مربوط به بتن معیار و شش طرح حاوی سنگدانه های پلیمری با درصد های جایگزینی ۱۵٪ و ۳۰٪ می باشد. فرایند اختلاط بتن، به وسیله پن میکسری الکتریکی با گنجایش ۰/۱۵ متر مکعب انجام می شود. قالب های نمونه ها از بتن تازه در سه لایه پر می شود به گونه ای که با ریختن هر لایه، قالب ها تحت لرزش میز ویبره قرار گرفته می شوند تا حباب های هوا از بتن تازه خارج شده و دانه ها به خوبی در بین یکدیگر و خمیر سیمان جای گیرد و در نتیجه بتن توپر و متراکم تری بدست آید. علاوه بر این، عمل تراکم در بتن تازه سبب می شود که پس از باز کردن قالب ها،

سطح ظاهری صاف و بدون خلل و فرج برای بتن حاصل شود. در نهایت نیز پس فرایند تراکم و تحکیم بتن، عمل پرداخت سطحی بر روی تمامی نمونه ها صورت می گیرد. مطابق استاندارد ASTM C192 [۲۲]، نمونه ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب جدا می شوند و برای مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار داده می شوند تا فرایند عمل آوری بتن صورت پذیرد. پس از گذشت ۲۸ روز به جهت انجام آزمایش های مکانیکی، نمونه ها برای مدت پنج ساعت کنار گذاشته می شوند تا خشک گردند. برای هر یک از نمونه های استوانه ای که تحت آزمایش مقاومت فشار قرار خواهند گرفت، به جهت ایجاد سطوحی صاف در حین بارگذاری، دو انتهای آن ها به وسیله سولفور مذاب، مطابق استاندارد ASTM C617 کلاهک گذاری[2] می شوند [۲۳].

در این پژوهش برای هر یک از آزمایش های مکانیکی بتن سخت شده، مطابق جدول ۴، سه قالب فولادی جهت ساخت نمونه های بتن در نظر گرفته شده است. به گونه ای که برای آزمایش های مقاومت کششی غیر مستقیم و فشاری بتن، شش قالب استوانه ای با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر و برای مقاومت خمشی از ۳ قالب مکعب مستطیل با عرض و عمق ۱۵۰ و طول ۶۰۰ میلی متر مطابق استاندارد ASTM C31، آماده استفاده می شوند [۲۴].

جدول ۴: تعداد و نوع نمونه های ساخته شده هر طرح اختلاط، برای هر یک از آزمایش های مکانیکی بتن

	آزمایش	کد طرح C	PET15%	PET30%	HIPS15%	HIPS30%	PP15%	PP30%
تعداد نمونه	آزمایش مقاومت فشاری	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای
	آزمایش مقاومت کششی	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای	۳ استوانه ای
	آزمایش مقاومت خمشی	۳ مکعب مستطیلی	۳ مکعب مستطیلی	۳ مکعب مستطیلی	۳ مکعب مستطیلی	۳ مکعب مستطیلی	۳ مکعب مستطیلی	۳ مکعب مستطیلی
	مجموع تعداد نمونه ها=	۶۳						

به جهت دست یابی به آزمونه هایی با سطح صاف، تمامی قالب ها قبل از هر مرحله ریختن بتن تازه، به طور کامل عاری از هر گونه گرد و غبار و سنگ ریزه ها شده و روغن کاری می شود تا فرایند قالب برداری به سهولت انجام پذیرد. علاوه بر این، در هر مرحله قبل از شروع فرایند اختلاط بتن، از محکم بودن اتصالات قالب های به کار رفته، اطمینان حاصل شده است تا آب بتن در حین گیرش سیمان، درون قالب حفظ شود و از خارج شدن آب از طریق درز های قالب، جلوگیری شود.

– فرآیند انجام آزمایش و اندازه گیری های انجام شده بر روی بتن

قبل از انجام هر یک از آزمایش های بتن تازه، نمونه گیری[3] از بتن تازه صورت می گیرد. نمونه برداری از بتن تازه مطابق استاندارد ASTM C172 انجام می شود [۲۵]. آزمایش اسلامپ در این پژوهش مطابق استاندارد ASTM C143 انجام می شود [۲۶]. پس از تعیین عدد اسلامپ، چگالی بتن تازه مطابق استاندارد ASTM C138، به صورت متراکم اندازه گیری می شود [۲۷]. در طی مراحل ساخت بتن، پس از این که نمونه ها پس از گذشت ۲۸ روز، از داخل حوضچه آب به جهت خشک شدن، خارج می شوند، قبل از انجام هر یک از آزمون های مکانیکی بتن، چگالی آن ها طبق استاندارد ASTM C642، محاسبه می شود [۲۸]. آزمون سرعت پالس التراسونیک، یک روش غیر مخرب موثر به جهت ارزیابی کیفیت و میزان یکنواختی و تخمین عمق ترک در مصالح بتنی می باشد. روش انجام این آزمون در این پژوهش، مطابق استاندارد ASTM C597، صورت می گیرد [۲۹]. مقاومت فشاری یکی از اصلی ترین، خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده به شمار می رود بر اساس استاندارد ASTM C39 تعیین می گردد [۳۰]. در این پژوهش مقاومت کششی بتن به صورت غیر مستقیم و با

[2] Capping
[3] Sampling

آزمون شکافت کششی که به نام آزمایش برزیلی نیز شناخته می شود، تعیین می شود. مطابق استاندارد ASTM C496، نمونه استوانه ای مورد نظر از پهلو، در داخل دستگاه جک بتن شکن، تحت فشار قرار می گیرد [۳۱]. مقاومت خمشی بتن در حقیقت مقاومت کششی بتن در کشش ناشی از خمش است که در این پژوهش با آزمایش خمش سه نقطه ای مطابق استاندارد ASTM C293 تعیین می گردد [۳۲]. از مقاومت خمشی بتن با عنوان مدول گسیختگی نیز نامیده می شود.

۳- بررسی و تحلیل نتایج

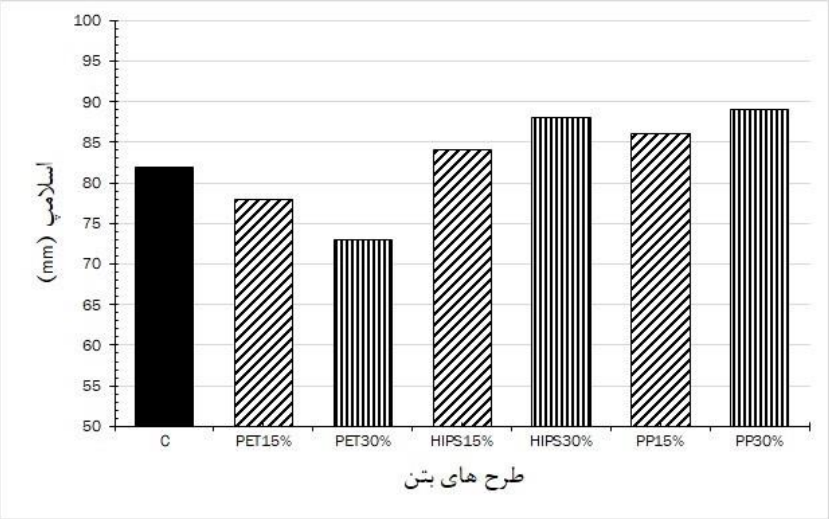
- نتایج آزمون تعیین اسلامپ بتن

نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ که در حقیقت معیاری از کارایی بتن به حساب می آید، در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: نتایج آزمون اسلامپ برای بتن های مختلف

ردیف	کد طرح	اسلامپ (mm)
۱	C	۸۲
۲	PET15%	۷۸
۳	PET30%	۷۳
۴	HIPS15%	۸۴
۵	HIPS30%	۸۸
۶	PP15%	۸۶
۷	PP30%	۸۹

در نمودار شکل ۵، عدد اسلامپ هر یک از بتن های حاوی سنگدانه های پلیمری در مقایسه با بتن معیار، نشان داده شده است. عدد اسلامپ برای بتن معیار، ۸۲ میلی متر بدست آمد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهند که با افزایش میزان حضور سنگدانه های پلیمری شامل PP و HIPS، کارایی بتن بهبود می یابد. حداکثر این میزان افزایش، برای این مواد به ترتیب برابر ۸/۵٪ و ۷/۳٪ می باشد. این در حالی است که با افزایش میزان سنگدانه پلیمری PET در ساختار بتن، کارایی آن به میزان ۱۱٪ دچار افت می شود. با توجه به نتایج بدست آمده، ذکر این نکته نیز حائز اهمیت می باشد که با افزایش میزان درصد جایگزینی هر یک از سنگدانه های پلیمری، میزان اثری که بر کارایی بتن تازه گذاشته می شود، بیشتر خواهد شد. می توان عنوان نمود افزایش کارایی بتن حاوی سنگدانه های PP و HIPS، در مقابل کاهش کارایی بتن حاوی سنگدانه های PET، به سبب شکل دانه ها است. همان طور که در ابتدای فصل قبل اشاره شد، بیشتر دانه های PP و HIPS، دارای شکلی نامنظم و گوشه دار بوده اند؛ این در حالی است که اکثر دانه های PET، پولکی و سوزنی شکل می باشند. از آن جایی که در یک حجم یا وزن ثابت، دانه های پولکی در مقابل با دانه های گوشه دار، دارای سطح ویژه، فضای خالی و مقاومت اصطحکاکی کمتری می باشند، بنابراین به میزان آب بیشتری احتیاج دارند و بتن حاوی این سنگدانه ها دارای کارایی کمتر و عدد اسلامپ پایین تری می باشد. هر قدر وجود این ذرات در ساختار سنگدانه بتن بیشتر باشد، افت کارایی بتن نیز بیشتر خواهد شد.



شکل ۵: نمودار تغییرات عدد اسلامپ برای هر یک از طرح های اختلاط بتن

- نتایج آزمون تعیین چگالی بتن تازه

نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶، نشان داده شده است. چگالی بتن در حقیقت معیاری برای تعیین وزن بتن می باشد. برای هر یک از طرح های بتن ساخته شده، با رعایت الزامات نمونه گیری از بتن تازه، چگالی بتن محاسبه شده است. علاوه بر این، با مشاهده نتایج بدست آمده، نتیجه گرفته می شود که با افزایش میزان سنگدانه های پلیمری در ساختار بتن، چگالی بتن تازه کاهش می یابد. علت این امر آن است که در طی فرایند انتخاب طرح اختلاط، عمل جایگزینی به صورت حذف حجم مشخصی از ماسه با وزن مخصوص بالاتر و استفاده از ریز دانه های پلیمری با وزن مخصوص پایین تر برای همان حجم می باشد. همچنین قابل مشاهده است که چگالی بتن های حاوی سنگدانه های پلیمری با میزان درصد جایگزینی یکسان، برای بتن حاوی PET بیشتر از بتن حاوی پلی استایرن و PP است چرا که با توجه به مشخصات وزنی پلیمر ها، میزان چگالی PET بیشتر از دو ماده دیگر می باشد.

جدول ۶: نتایج آزمایش چگالی بتن تازه

ردیف	کد طرح	جرم ظرف (kg)	جرم ظرف پر (kg)	جرم بتن تازه (kg/m^3)	حجم ظرف (m^3)	چگالی بتن تازه (kg/m^3)
۱	C		۱۹/۹۲	۱۶/۹۳		۲۴۵۳/۶
۲	PET15%		۱۹/۶۶	۱۶/۶۷		۲۴۱۵/۹
۳	PET30%		۱۹/۴۶	۱۶/۴۷		۲۳۸۷
۴	HIPS15%	۲/۹۹	۱۹/۴۲	۱۶/۴۳	۰/۰۰۶۹	۲۳۸۱/۲
۵	HIPS30%		۱۸/۹۹	۱۶		۲۳۱۸/۸
۶	PP15%		۱۹/۳۵	۱۶/۳۶		۲۳۷۱
۷	PP30%		۱۸/۸۶	۱۵/۸۷		۲۳۰۰

- نتایج آزمون تعیین چگالی بتن سخت شده

نتایج این آزمون برای هر یک از طرح های بتن ساخته شده در جدول ۷، نشان داده شده است. نتایج این آزمون مشابه آزمایش چگالی بتن تازه، نشان می دهند، در صورتی که سنگدانه های پلیمری، جایگزین بخشی از ماسه شوند، از چگالی بتن کاسته می شود و این امر در نهایت منجر به سبک تر شدن بتن در یک حجم مشخص خواهد شد. چرا که سنگدانه های پلیمری دارای وزن مخصوص به مراتب

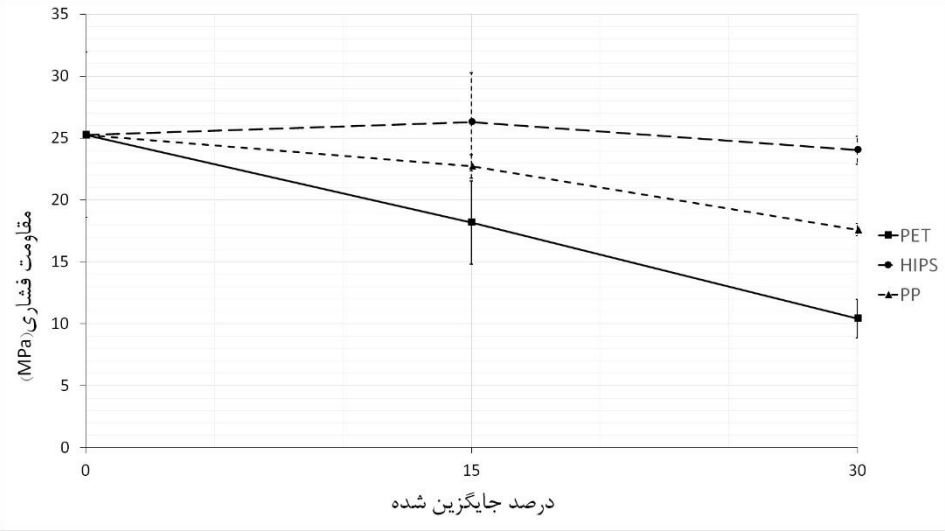
پایین تری، نسبت به سنگدانه های طبیعی می باشند. حداکثر این میزان کاهش برای هر یک از بتن های حاوی PET، HIPS و PP، به ترتیب برابر ۹/۵٪، ۱۲٪/۳ و۱۷٪ می باشد. علاوه بر این، نتایج بدست آمده نشان می دهند که میزان افت چگالی در حضور کمتر از حدود ۱۰٪ از هر یک از مواد پلیمری، ناچیز می باشد.

جدول ۷: نتایج آزمون چگالی بتن سخت شده آزمونه ها

ردیف	کد طرح	چگالی متوسط (kg/m^3)
۱	C	۲۳۶۳
۲	PET15%	۲۲۲۴
۳	PET30%	۲۱۳۸
۴	HIPS15%	۲۱۹۱
۵	HIPS30%	۲۰۷۲
۶	PP15%	۲۱۰۵
۷	PP30%	۱۹۶۰

– نتایج آزمون مقاومت فشاری

مقاومت فشاری متوسط هر یک از طرح های بتن ساخته شده، از میانگین گیری مقاومت های فشاری سه آزمونه مربوط به آن، حاصل می شود. در شکل ۶، نمودار تغییرات مقاومت فشاری متوسط انواع بتن با میزان درصد های جایگزینی مختلف ارائه شده است. در نگاه اول، این نمودار نشان می دهد که با افزایش میزان سنگدانه های پلیمری در بتن، مقاومت فشاری آن دچار افت می شود. بنابراین، اولین عامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه های پلیمری جایگزین شده، میزان درصد جایگزینی مواد پلیمری می باشد. علاوه بر آن، نتایج خوب بتن حاوی سنگدانه های HIPS نیز قابل چشم پوشی نیست. به گونه ای که مقاومت بتن در ۱۵٪ جایگزینی بیش از ۴٪ افزایش می یابد، اما به تدریج با افزایش میزان این ماده تا ۳۰٪، مقاومت فشاری بتن تا میزان ناچیز ۵٪ کاهش می یابد. این در حالی است که برای بتن دارای PP به میزان ۱۵٪، مقاومت فشاری آن تا حدودی قابل قبول می باشد و مقدار آن به میزان ۱۰٪ کاهش می یابد؛ اما با افزایش میزان این مواد تا ۳۰٪ جایگزینی، مقاومت فشاری بتن به میزان ۳۰٪ دچار افت می شود. علاوه بر آن، برای بتن حاوی PET، در مقایسه با دیگر بتن های ساخته شده، دارای عملکرد پایین تری می باشد، به گونه ای که برای میزان های جایگزینی ۱۵٪ و ۳۰٪، مقاومت فشاری بتن به ترتیب به مقدار ۲۸٪ و ۵۹٪، دچار افت شدیدی می شود.

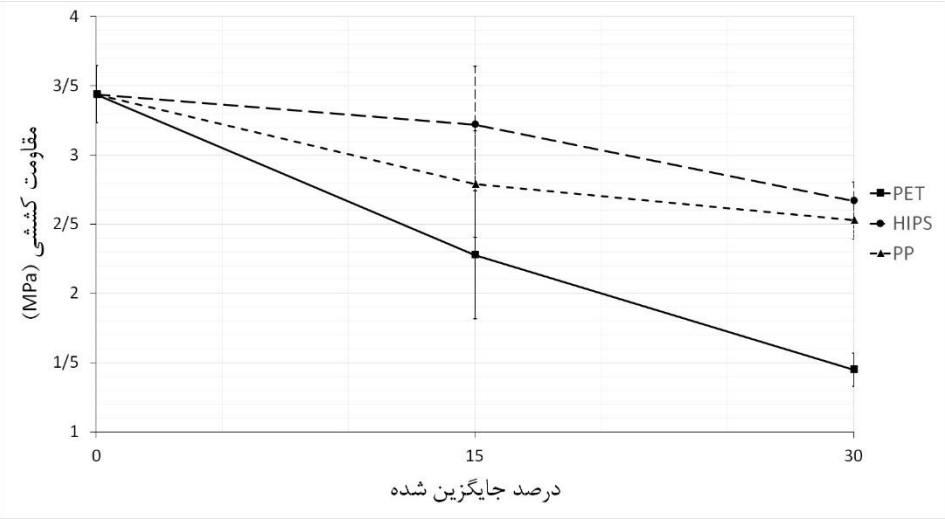


شکل ۶: نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن با افزایش میزان درصد جایگزینی سنگدانه های پلیمری

علت اصلی افت شدید مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه های PET، در شکل سنگدانه های آن می باشد. اگرچه این ماده جزو پلیمر های مهندسی است و به مراتب، در مقایسه با PP، دارای عملکرد و خواص ذاتی بهتری می باشد، اما در نتایج بدست آمده از این پژوهش، مشاهده می شود که عامل شکل سنگدانه ها، بر نوع مواد به کار رفته غلبه می کند و بر مقاومت فشاری، تأثیر به سزایی می‌گذارد. همچنین اگرچه شکل ظاهری سنگدانه های PP و HIPS مشابه هم هستند، اما مشاهده می شود که بتن حاوی HIPS، حداقل به میزان ۱۴٪ دارای عملکرد بهتری می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بعد از میزان درصد جایگزینی و نوع شکل سنگدانه ها، نوع مواد پلیمری جایگزین شده با ماسه نیز از عوامل تأثیر گذار بر مقاومت فشاری بتن به حساب می آید.

- **نتایج آزمون مقاومت کششی**

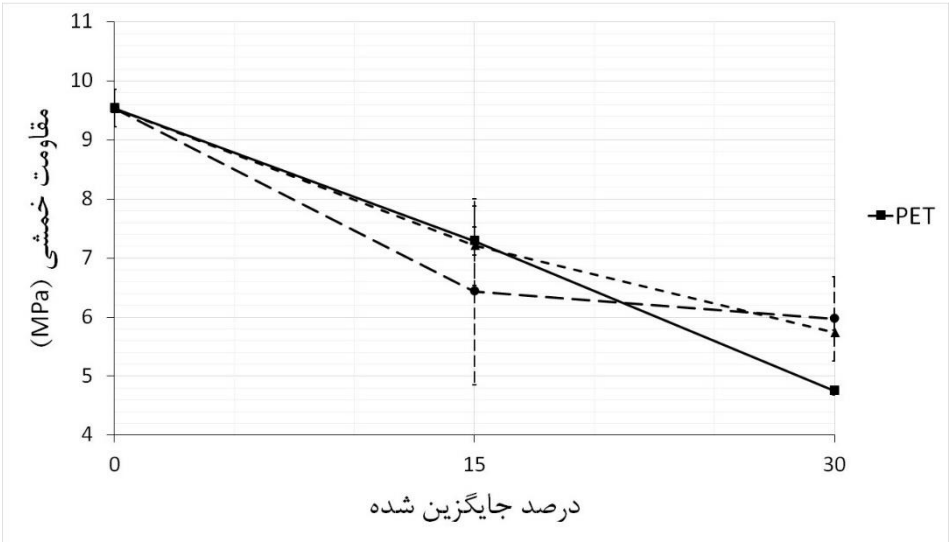
در شکل ۷، نمودار تغییرات این مقاومت، با درصد های جایگزینی مختلف ارائه شده است. اولین نکته ای که در این خصوص قابل مشاهده است، کاهش پیوسته مقاومت کششی بتن، با افزایش حضور سنگدانه های پلیمری در ساختار بتن می باشد. علاوه بر این، مشابه آزمون فشار، نتایج بدست آمده از مقاومت کششی بتن حاوی HIPS، به خصوص در میزان جایگزینی ۱۵٪، به مراتب بهتر از دو نوع بتن دیگر ساخته شده، می باشد. با توجه به این که رابطه ای مستحکم، بین مقاومت کششی و فشاری بتن وجود دارد، به همین جهت نتایج بدست آمده از این آزمون نیز سازگار با آزمایش فشار می باشد. اما نکته مهم دیگری که وجود دارد، این است که مشابه آزمون فشار، در ۱۵٪ جایگزینی، هیچ رشدی در مقاومت کششی بتن حاوی HIPS، مشاهده نشد. از آن جایی که هیچ یک از سنگدانه های پلیمری، قادر به جذب آب نمی باشند، عمل هیدراسیون سیمان بر روی سطح آن ها اتفاق نمی افتد. بنابراین، هر چه میزان سنگدانه های پلاستیکی در ساختار بتن افزایش یابد، جداسازی خرده پلاستیک ها و سایر اجزای ملات سیمان اتفاق می افتد که در پی آن مقاومت کششی بتن کاهش می یابد. علاوه بر این، روند کاهشی نمودار تغییرات مقاومت کششی بتن، نشان دهنده کمتر بودن روند افت مقاومت در بتن حاوی PP، در مقایسه با دیگر بتن های حاوی سنگدانه های پلیمری می باشد.



شکل ۷: نمودار تغییرات مقاومت کششی بتن با افزایش میزان درصد جایگزینی سنگدانه های پلیمری

- **نتایج آزمون مقاومت خمشی**

نتایج آزمون مقاومت خمشی در شکل ۸، نشان داده شده است.



شکل ۸: نمودار تغییرات مقاومت خمشی بتن با افزایش میزان درصد جایگزینی سنگدانه های پلیمری

اولین نکته ای که از نمودار و نتایج آزمون ها، قابل برداشت است، مشابه آزمون های مقاومت فشاری و کششی، مقاومت خمشی نیز با افزایش میزان درصد جایگزینی سنگدانه های پلیمری، کاهش می یابد. به گونه ای که در ۱۵٪ جایگزینی، بتن های حاوی PET، HIPS و PP، به ترتیب ۲۳٪، ۳۲٪ و ۲۴٪ دچار افت می‌شوند. علاوه بر این، در ۳۰٪ جایگزینی، این میزان افت به ترتیب برابر ۵۰٪، ۳۷٪ و ۴۰٪ می گردند. علت این امر آن است که با افزایش میزان سنگدانه های پلیمری، این سنگدانه ها کنار یکدیگر انباشته شده و موجب کاهش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه های طبیعی می شود. به همین جهت بر خلاف دو آزمون قبل، بتن حاوی PET تا میزان جایگزینی ۱۵٪ در مقایسه با دیگر بتن های ساخته شده، نتایج بهتری از خود نشان داده است. با توجه به نمودار تغییرات مقاومت خمشی بتن، ذکر این نکته نیز ضروری است که بتن حاوی PP نه تنها تا مقدار ۱۵٪ نتیجه خوبی از خود نشان داد، بلکه با افزایش این ماده در بتن تا ۳۰٪، میزان مقاومت خمشی آن کمتر از بتن حاوی PET دچار افت شد. این در حالی است که رفتار خمشی بتن حاوی HIPS، کمی متفاوت با دو بتن دیگر می باشد، به طوری که تا ۱۵٪ جایگزینی، مقاومت آن با شدت بیشتری کاهش یافته، اما با افزایش میزان این ماده تا ۳۰٪، بتن کمترین افت عملکردی را به خود دیده است.

– نتایج آزمون سرعت پالس التراسونیک

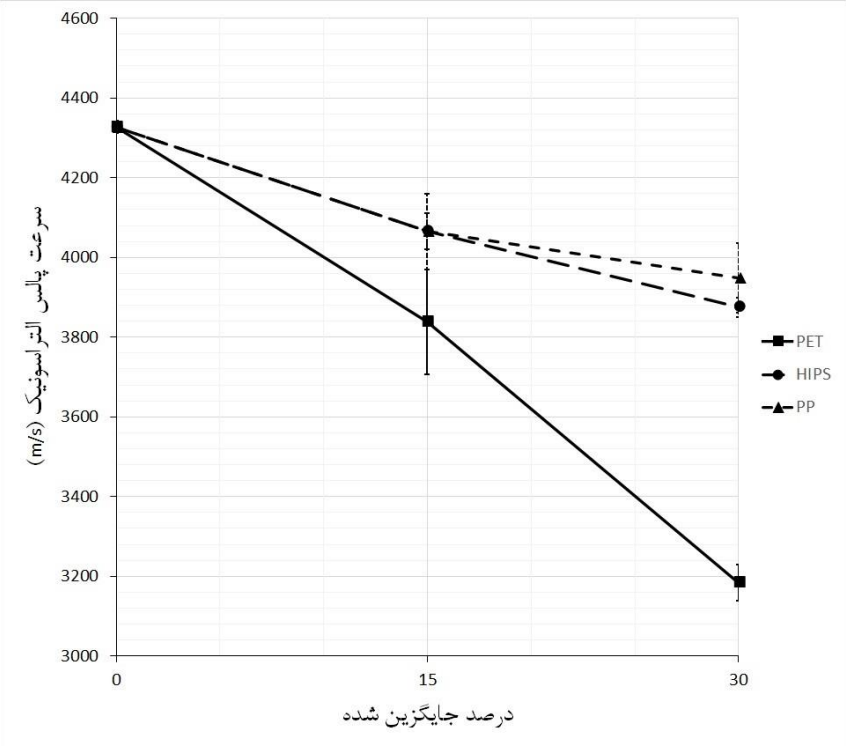
رفتار غیر مخرب بتن حاوی سنگدانه های پلیمری، بر اساس اندازه گیری سرعت پالس التراسونیک تعیین شد و نتایج آن در جدول ۸ و نمودار شکل ۹، قابل مشاهده است.

جدول ۸: نتایج آزمون سرعت پالس التراسونیک انواع بتن

ردیف	کد طرح	سرعت پالس التراسونیک			میانگین سرعت پالس التراسونیک
		۱۵ cm	۳۰ cm	۴۵ cm	
۱	C	۴۳۲۲	۴۳۳۴	۴۳۲۷	۴۳۲۷
۲	PET15%	۳۷۸۷	۳۸۳۶	۳۸۹۲	۳۸۳۸
۳	PET30%	۳۱۷۲	۳۲۰۵	۳۱۷۶	۳۱۸۴
۴	HIPS15%	۴۰۵۴	۴۰۸۷	۴۰۵۷	۴۰۶۶
۵	HIPS30%	۳۸۷۱	۳۸۸۶	۳۸۶۸	۳۸۷۵
۶	PP15%	۴۰۴۱	۴۱۰۹	۴۰۴۴	۴۰۶۵
۷	PP30%	۳۹۳۱	۳۹۸۹	۳۹۲۶	۳۹۴۹

این آزمون برای هر یک از طرح های بتن ساخته شده و نیز بر روی یک نمونه مکعب مستطیلی انجام شده است. مبدل های دستگاه در سه وضعیت یک چهارم ابتدا، وسط و یک چهارم انتهایی طول نمونه، قرار گرفته شدند و سرعت امواج عبوری بین مبدل ها، در هر یک از این وضعیت ها، مطابق جدول ۸ ثبت شده است. در نهایت سرعت های ثبت شده در هر یک از انواع بتن، مطابق جدول، میانگین گرفته می شوند و نتیجه بدست آمده، مبنای تحلیل سرعت پالس التراسونیک هر یک از بتن ها قرار خواهد گرفت.

با اولین نگاه به نتایج، ملاحظه می شود که با افزایش حضور میزان سنگدانه های پلیمری در بتن، مقدار سرعت پالس التراسونیک کاهش می یابد، در حالی که این کاهش تا ۱۵٪ جایگزینی، برای بتن حاوی PET ۳٪، ۱۱٪، و برای بتن دارای سنگدانه های HIPS و PP، تنها به میزان ۶٪ می باشد. در ادامه، با افزایش میزان سنگدانه های پلاستیکی تا ۳۰٪، این بتن دارای PP است که کمتر از HIPS دچار تنزل شده، به گونه ای که سرعت امواج عبوری از بتن به میزان ۸٪ شده است. این رقم برای بتن حاوی HIPS و PET، به ترتیب برابر ۱۰٪ و ۲۶٪ ثبت شده است. علت این کاهش آن است که با افزایش میزان حجم جایگزینی ماسه طبیعی با سنگدانه های پلاستیکی، میزان حفره ها و عیوب در ساختار بتن افزایش می یابد و به دنبال آن، کرموشدگی بتن بیشتر می شود. در نهایت این عامل، موجب تضعیف شدن سرعت عبوری امواج التراسونیک می گردد. به نحوی دیگر، شکل سنگدانه های پلیمری، می تواند عاملی تأثیرگذار در کرموشدگی بتن باشد. چرا که با توجه به نمودار بالا، از آن جایی که شکل دانه های PP و HIPS مشابه یکدیگر هستند، سرعت عبوری امواج التراسونیک آن ها مشابه هم بدست آمدند، اما این شاخص برای بتن حاوی PET، با توجه به پولکی بودن دانه های پلاستیکی آن، دچار افت شدیدی شده است.



شکل ۹: تغییرات سرعت پالس التراسونیک انواع بتن

نتیجه گیری

در این پژوهش، مطالعات آزمایشگاهی بر روی بتن معمولی و همچنین بتن حاوی سنگدانه های ریز جایگزین شده پلیمری، صورت گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان عنوان نمود میزان درصد جایگزینی، شکل و نوع سنگدانه های پلاستیکی، دارای بیشترین

اثر در مشخصات بتن می باشند. به گونه ای که هر قدر از میزان سنگدانه های طبیعی ماسه، کاسته و بر میزان ریزدانه های پلیمری افزوده شود، افت خواص به طور قابل ملاحظه ای مشاهده می شود. علاوه بر این، مشابه تحقیقات گذشته، مشخص شد که عملکرد بتن حاوی سنگدانه های پلیمری با شکل نامنظم و گوشه دار، بهتر از بتن حاوی سنگدانه های پلیمری پولکی و سوزنی شکل است. افزون بر این، نتایج آزمایش ها نشان دادند که با توجه به بهتر بودن خواص ذاتی HIPS، در مقایسه با PP، با وجود مشابه بودن شکل دانه ها، بتن حاوی HIPS نسبت به بتن حاوی PP جایگزین شده، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. سایر نتایج اصلی حاصل از این پژوهش عبارتند از:

۱. با جایگزینی ماسه با سنگدانه های PP و HIPS، کارایی بتن دچار تغییرات قابل ملاحظه ای نشد در حالی‌که در بتن حاوی PET، با توجه به پولکی شکل بودن دانه ها، کاهش بیشتری مشاهده گردید. همچنین چگالی بتن سخت شده با افزایش میزان حضور پرک های پلاستیکی، دچار افت بیشتری شدند. این به سبب کمتر شدن وزن سنگدانه های طبیعی با چگالی بالا و جایگزینی آن‌ها با سنگدانه های پلیمری با چگالی کمتر می‌باشد. نتایج نشان داد که این میزان کاهش وابسته به نوع پلاستیک می باشد.

۲. نتایج مقاومت فشاری در بتن های حاوی ۱۵٪ سنگدانه های پلاستیکی جایگزین شده، بهتر از بتن های شامل ۳۰٪ پرک های پلاستیکی بدست آمدند. به گونه ای که در ۱۵٪ جایگزینی، میزان افت مقاومت فشاری بتن دارای PP و PET، نسبت به بتن معیار به ترتیب به میزان های ۱۰٪ و ۲۸٪ کمتر می باشد. این در حالی است که عملکرد بتن حاوی ۱۵٪ HIPS در مقاومت فشاری، نسبت به بتن معیار در حدود ۴٪ بهبود یافت. با افزایش جایگزینی تا ۳۰٪، این بتن شامل HIPS بود که بهترین عملکرد را نسبت به سایر بتن های دیگر از خود نشان داد و تنها به مقدار ۵٪ مقاومت فشاری آن کاهش یافت. این در حالی است که در دو نوع بتن دیگر مقاومت فشاری دچار افت نسبتاً شدیدی شد. نتایج مقاومت کششی بتن مشابه مقاومت فشاری بدست آمد. با این تفاوت که هیچ یک از بتن های مورد بررسی عملکرد بهتری نسبت به بتن معیار از خود نشان ندادند. با این حال بتن شامل HIPS کمترین افت و بتن شامل PET، بیشترین افت را به خود اختصاص داده است. مدول گسیختگی در مقایسه با دیگر خواص مکانیکی بتن، بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته است، به گونه ای که حداقل افت مقاومت خمشی در حدود ۲۴٪ به ثبت رسیده است. نتایج بدست آمده از آزمایش، نشان دادند که در ۱۵٪ جایگزینی، بتن حاوی PET عملکرد بهتر و بتن دارای HIPS، عملکرد ضعیف تری از خود نشان داده است. این در حالی است که با افزایش میزان حضور سنگدانه های پلاستیکی تا ۳۰٪، نتایج کاملاً برعکس می شوند.

۳. میزان افت تقریباً ناچیزی در سرعت پالس التراسونیک هر یک از بتن های ساخته شده با سنگدانه های پلاستیکی جایگزین شونده، مشاهده می شود. اما در بتن شامل سنگدانه های PET، به خصوص در مقدار جایگزینی ۳۰٪، این کاهش بیشتر مشاهده می شود که علت آن به شکل پولکی پرک های پلاستیکی ارتباط دارد.

مراجع

[۱] Frigione, Mariaenrica. "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete." *Waste management* 30.6 (2010): 1101-1106.

[۲] Saikia, Nabajyoti, and Jorge de Brito. "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate." *Construction and building materials* 52 (2014): 236-244.

[۳] Saikia, Nabajyoti, and Jorge de Brito. "Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete." *Materials Research* 16.2 (2013): 341-350.

[۴] Akçaözoğlu, Semiha, Kubilay Akçaözoğlu, and Cengiz Duran Atiş. "Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)." *Composites Part B: Engineering* 45.1 (2013): 721-726.

[۵] Rahmani, E., et al. "On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles." *Construction and Building Materials* 47 (2013): 1302-1308.

[۶] Islam, Md Jahidul, Md Salamah Meherier, and AKM Rakinul Islam. "Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete." *Construction and Building materials* 125 (2016): 946-951.

[۷] Azhdarpour, Amir Mahyar, Mohammad Reza Nikoudel, and Milad Taheri. "The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation." *Construction and building Materials* 109 (2016): 55-62.
[۸] Senhadji, Y., et al. "Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete." *Journal of Adhesion Science and Technology* 29.7 (2015): 625-640.
[۹] Mohammed, Azad A., Ilham I. Mohammed, and Shuaaib A. Mohammed. "Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets." *Construction and Building Materials* 201 (2019): 232-245.
[۱۰] Yang, Shutong, et al. "Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles." *Construction and Building Materials* 84 (2015): 444-453.
[۱۱] Ozbakkaloglu, Togay, Lei Gu, and Aliakbar Gholampour. "Short-term mechanical properties of concrete containing recycled polypropylene coarse aggregates under ambient and elevated temperature." *Journal of Materials in Civil Engineering* 29.10 (2017): 04017191.
[۱۲] پوریا درزه کنانی ، تأثیر انواع سنگدانه های پلیمری بازیافتی بر مشخصات مکانیکی بتن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۹۸.
[۱۳] سازمان ملی استاندارد ایران، شماره ۳۸۹، ویژگی های سیمان پرتلند.
[۱۴] ASTM, D. "Standard Practice for Identification of Polymer Layers or Inclusions by Fourier Transform Infrared Microspectroscopy (FT-IR)." D5477-18 (2018).
[۱۵] ASTM, C. "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates." *C136-06* (2006).
[۱۶] ASTM, C. "Standard Test Method for Materials Finer than 75-μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing." C117-17 (2017).
[۱۷] ASTM, C. "Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate." C29-17 (2017).
[۱۸] ASTM, C. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate." C127-15 (2015).
[۱۹] ASTM, C. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate." C128-15 (2015).
[۲۰] ASTM, C. "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement." C188-17 (2017).
[۲۱] ACI 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete." 211.1-91 (2002).
[۲۲] ASTM, C. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory." C192M-18 (2018).
[۲۳] ASTM, C. "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens." C617M-15 (2015).
[۲۴] ASTM, C. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field." C31M-19 (2019).
[۲۵] ASTM, C. "Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete." C172M-17 (2017).
[۲۶] ASTM, C. "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete." C143M-15a (2015).
[۲۷] ASTM, C. "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete." C138M-17a (2017).
[۲۸] ASTM, C. "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete." C642-13 (2013).
[۲۹] ASTM, C. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete." C597-16 (2016).
[۳۰] ASTM, C. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." C39M-18 (2018).
[۳۱] ASTM, C. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens." C496M-17 (2017).
[۳۲] ASTM, C. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)." C293M-16 (2016).