

# Laboratory investigation of compressive strength and permeability of lightweight sustainable concrete containing glass factory waste

Zahra Mirzaei \*

M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Alborz University, Qazvin, Iran

Roohollah Taherkhani

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

\*Corresponding author's email address:  
zahramirzaei@yahoo.com

# بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری و نفوذ بتن پایدار سبک حاوی پسماند کارخانجات شیشه

زهرا میرزایی\*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران دانشگاه دانش البرز، قزوین، ایران

روح اله طاهرخانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷

## Abstract

Achieving sustainable construction requires changing conventional processes and implementing new approaches to minimize the adverse environmental impacts of the construction industry. Considering the growth in production within the construction industry, the development of concrete products has emerged as a significant threat to achieving sustainable development due to their environmental degradation. This study investigates the partial replacement of cement with glass waste in lightweight concrete and its impact on the compressive strength and permeability of concrete. Additionally, sustainability indicators of concrete are evaluated. To assess the effect of glass waste on the strength of lightweight concrete, glass waste particles were substituted at percentages of 5%, 10%, and 15% for cement. The results of compressive strength and permeability tests were analyzed. The findings of this research indicate that replacing a percentage of cement with glass waste increases the compressive strength of concrete, with the optimal replacement obtained from the 5% substitution of glass powder with cement according to the experimental results.

## Keywords

Waste glass, lightweight concrete, sustainable development, compressive strength, permeability

## چکیده

تحقق ساخت و ساز پایدار مستلزم تغییر فرآیندهای متداول و پیاده سازی رویکردهای جدیدی است که اثرات مخرب زیست محیطی صنعت ساخت را به حداقل ممکن برساند. با عنایت به اینکه با رشد تولید در صنعت ساخت، توسعه محصولات بتنی به عنوان یک پدیده مخرب زیست محیطی، تهدیدی جدی برای تحقق توسعه پایدار محسوب می گردد، در این تحقیق به بررسی جایگزینی درصدی از سیمان با پسماند شیشه در بتن سبک و تأثیر آن بر مقاومت فشاری بتن و نفوذپذیری آن پرداخته شد. همچنین شاخص های توسعه پایداری بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر پسماند شیشه بر مقاومت بتن سبک، ذرات پسماند شیشه در درصدهای ۵٪ و ۱۰٪ و ۱۵٪ جایگزین سیمان گردید. با انجام آزمایشات مقاومت فشاری و نفوذپذیری، نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصله از این تحقیق نشان داد، جایگزینی پسماند شیشه با درصدی از سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می شود که مقدار بهینه بدست آمده از آزمایشات جایگزینی ۵٪ از پودر شیشه با سیمان می باشد.

## کلمات کلیدی

پسماند شیشه، بتن سبک، توسعه پایدار، مقاومت فشاری، نفوذپذیری

در بتن به طور جدی بر پارامترهای زیست محیطی سازه های بتنی موثر است. بنابر این استفاده از مواد جایگزین سیمان در بتن مانند، خاکستر بادی، پسماند ضایعاتی کارخانجات شیشه و غیره، به منظور کاهش آلودگی های ناشی از تولید و استفاده از سیمان ضروری است. پیش بینی می شود که در تکنولوژی روز بتن، تولید CO<sub>2</sub> در روند ساخت سازه های بتنی نسبت به ساخت و سازه های صورت گرفته در ۲۰ سال پیش به زیر ۶۰ درصد برسد [۶].

امروزه دیگر عمر بتن معمولی به پایان رسیده و دیگر رغبت چندانی به استفاده از بتن معمولی نیست البته این موضوع در سازه های انبوه پررنگ تر است. بتن سبک، با توجه به طرح اختلاط های فراوانی که دارد انواع مختلفی هم دارد مثل بتن خود متراکم (SCC)

## ۱- مقدمه

امروزه توجه به اهداف توسعه پایدار جایگاه متمایزی در صنعت ساختمان یافته است [۱]. نظر به اینکه این صنعت در مقایسه با صنایع دیگر ابعاد گسترده ای دارد [۲] و روند صعودی تقاضا برای تولید سیستم های مختلف ساختمانی همچنان تداوم دارد [۳]، تحقق توسعه پایدار ایجاب می کند که اثرات مخرب زیست محیطی صنعت ساخت به صورت جدی کاسته شوند [۴]. با همین دیدگاه، توسعه محصولات بتنی به عنوان یک پدیده مخرب زیست محیطی مرتبط با آلودگی محیط زیست شناخته می شود. دستیابی به ساخت و ساز پایدار ایجاب می کند که صنعت ساخت در فرآیندهای خود تغییر ایجاد کند [۵]. در همین راستا، از آنجاکه استفاده از سیمان پرتلند



3 (2), 2018

دوره ۳، شماره ۲

تابستان ۱۳۹۷

فصلنامه پژوهشی



و بتن سبک دانه (LWAC) و بتن سبک خود متراکم (SCLWC) و یا بتن سبک سازه‌ای و یا بتن سبک غیر سازه‌ای که هر کدام کاربرد خاص خود را دارد و در شرایط مختلف استفاده می‌شود. بتن های سبک غیرسازه‌ای و سازه‌ای توانسته‌اند با داشتن خواص مناسبی نظیر سبکی وزن، عایق حرارتی، هزینه‌های کمتر تولید، حمل و نیز مقاومت کافی در برابر زلزله جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان داشته باشد [۷].

سالانه ۶ درصد از منابع طبیعی زمین یعنی ۴۵۰ میلیارد تن از منابع طبیعی و مواد خام موجود بر روی کره زمین به پایان می‌رسد و به جای این مصالح زباله‌های غیر قابل تجزیه به محیط زیست باز می‌گردد و خود این زباله‌ها نیز به نوعی محیط زیست را از بین می‌برند و علاوه بر آن باعث تغییر آب و هوا و گرم شدن زمین می‌شوند و موارد بسیاری زیاد دیگری که به وجود می‌آورند. بزرگترین مصرف کننده مواد خام در جهان بتن است که استخراج این مواد از معادن به ماشین آلات فراوانی نیاز دارد که هر کدام به نوبه‌ی خود باعث آلودگی هوا می‌شوند و فرآیند تبدیل این مواد به ماده قابل استفاده نیز آلودگی‌های خاص خود را دارد. امروزه استفاده از مواد افزودنی در بتن که در بعضی از موارد جایگزین مصالح بتن می‌شوند، بسیار رو به رشد است.

محققین تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی تاثیر افزودنی‌های بتن بر پارامترهای مقاومت و دوام بتن انجام داده‌اند. افزودنی‌هایی همچون پسماند کارخانجات شیشه، مصالح بازیافتی، متاکاکن، خاکستر بادی، الیاف‌های فولادی و پلاستیکی، نانورس و غیره کاربردهای فراوانی در صنعت بتن داشته‌اند. جایگزینی ۲۰٪ ضایعات شیشه با سیمان در بتن سبک سبب هوادهی بهتر این نوع بتن شده است [۸]. استفاده از الیاف فولادی در بتن‌های سبک سبب افزایش مقاومت پیچشی نمونه‌ها نسبت به بتن معمولی مسلح به الیاف است. [۷] استفاده از نانو ذرات در مقادیر کم در بتن سبب افزایش دوام بتن در شرایط تهاجم‌های محیطی می‌شود [۹]. آزمایشات بر روی بتن خود متراکم حاوی نانو سلیکا و نانو لوله‌های کربنی نشان از افزایش مقاومت و دوام بتن دارد [۱۰].

استفاده از نانوذرات SiO<sub>2</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به همراه الیاف فولادی سبب افزایش پیوند در مخلوط با درصد بالاتر سیمان می‌شوند. همچنین نانوذره Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> سبب کاهش ترک در بتن می‌شود. [۱۱] استفاده از الیاف‌های مختلف در بتن همانند پلی پروپیلن و فولاد سبب افزایش پارامترهای مقاومتی، مکانیکی و دوام بتن می‌شود [۱۲-۱۷]. پسماند شیشه نیز سبب بهبود بعضی از پارامترهای مقاومتی و دوام بتن می‌شود. استفاده از پسماند شیشه در بتن سبب افزایش مقاومت بتن می‌شود. همچنین افزودن پسماند شیشه در بتن باعث افزایش کارایی بتن می‌شود [۱۸، ۱۹]. محققین با افزودن پسماند شیشه ضایعاتی در بتن خود متراکم سبز توانستند واکنش‌های سیلیکایی-قلیایی در بتن

را تا ۵۰ درصد کاهش دهند. همچنین آنها یافتند که تاثیر پسماند شیشه بر مقاومت فشاری بتن متاثر از نسبت آب به سیمان است. نتایج نشان می‌دهد w/c مناسب برای بتن‌های خود متراکم حاوی پسماند شیشه در محدوده ۰٫۳۳ تا ۰٫۳۴ می‌باشد [۲۰]. پسماند شیشه بر روی خزش بتن نیز تاثیر دارد.

استفاده از ۲۰ درصد پسماند شیشه در بتن علاوه بر افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته آن سبب کاهش خزش در بتن نیز می‌شود (در نهایت می‌توان گفت استفاده از پسماند شیشه سبب کاهش ضایعات و هزینه‌های تولید بتن در پروژه‌های عمرانی می‌شود [۲۱، ۲۲]). با توجه به بررسی‌های صورت گرفته استفاده از مواد افزودنی همچون پسماند شیشه تاثیر مثبتی بر پارامترهای مقاومتی، مکانیکی و دوام انواع بتن دارد و با توجه به اهمیت بتن‌های سبک در بخش ساخت سازه‌های بتنی در این تحقیق سعی شد تا تاثیر افزودن پسماند ضایعاتی شیشه در بتن سبک بر مقاومت فشاری و نفوذ پذیری آن در محیط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۱-۲- مصالح

سیمان تیپ ۱-525 مصرفی در این تحقیق مطابق استاندارد ASTM C150 [23] استفاده شد. همچنین مصالح دانه‌ای مصرفی در بتن مطابق نمودار دانه بندی شکل ۱، ماسه رودخانه‌ای و سبکدانه لیکا خوب دانه بندی شده می‌باشد. ماسه مصرفی دارای وزن مخصوص ۲٫۷ در حالت SSD و چگالی انبوهی ۲٫۶۲ و چگالی دانه‌ای ۲٫۶۵ بوده و سبکدانه لیکا نیز با وزن مخصوصی به میزان ۱٫۲۲ در حالت SSD و چگالی انبوهی ۰٫۸ و چگالی دانه‌ای ۱٫۱ مورد استفاده قرار گرفته است. پسماند شیشه مصرفی در این تحقیق در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ به بتن اضافه شد. مشخصات شیمیایی پسماند شیشه و سیمان مصرف شده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین در این تحقیق به منظور افزایش کارایی بتن از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با دانسیته 1.10 مطابق با استاندارد ASTM C494 TYPE F [24] استفاده شده است.

### ۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق ۴ نوع طرح اختلاط به منظور بررسی تاثیر پسماند شیشه بر مقاومت فشاری بتن سبک استفاده شد. پسماند کارخانجات شیشه در درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان به بتن افزوده شد. جدول ۲ نشان دهنده طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد.

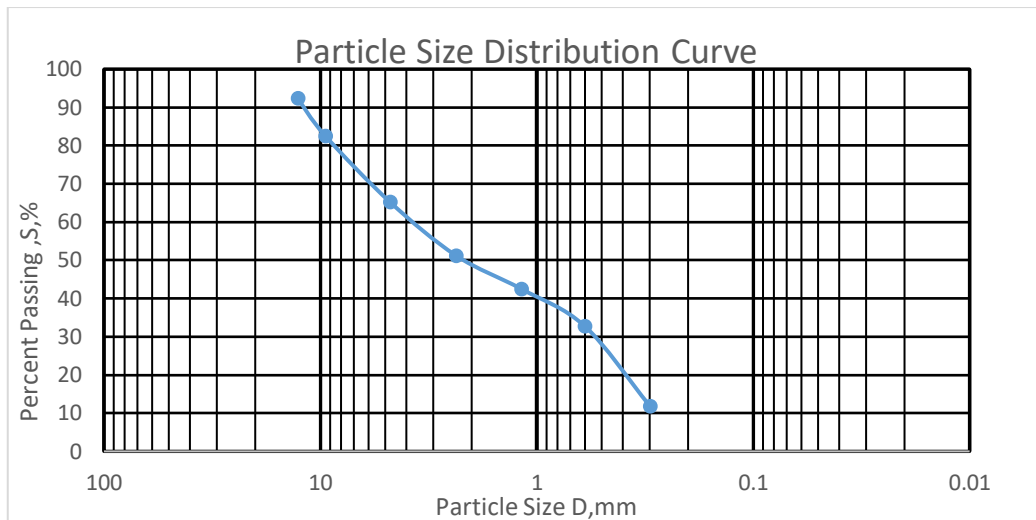


3 (2), 2018

دوره ۳، شماره ۲  
تابستان ۱۳۹۷

فصلنامه پژوهشی

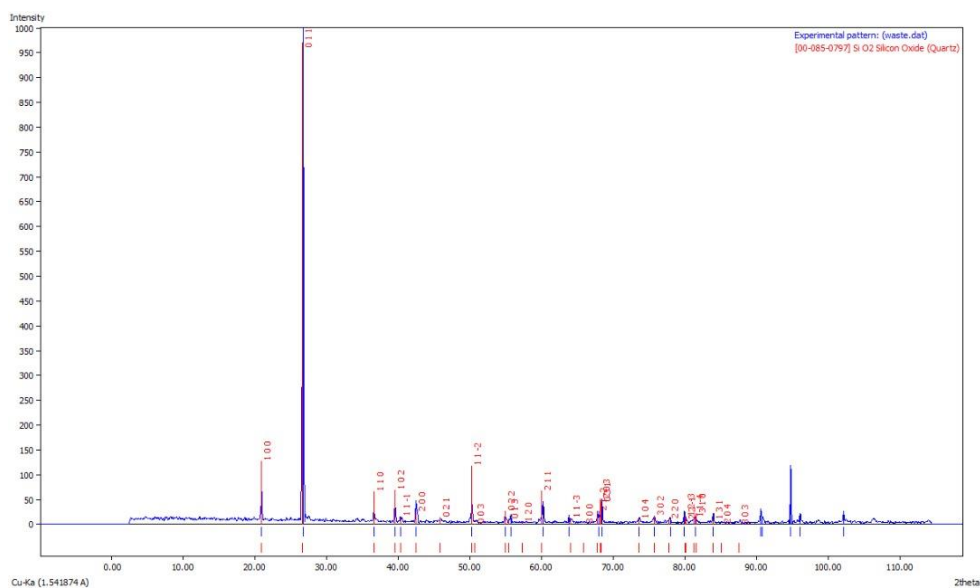




شکل ۱ نمودار دانه بندی سنگ دانه ها

جدول ۱ مشخصات شیمیایی پسماند شیشه و سیمان مصرفی در این پروژه

آنالیز شیمیایی	پسماند شیشه (% در صد وزنی)	سیمان (% در صد وزنی)
$SiO_2$	91.25	21.32
$Al_2O_3$	3.22	2.28
$Fe_2O_3$	0.52	3.92
$CaO$	1.71	64.21
$MgO$	0.32	1.94
$Na_2$	0.04	-
$K_2O$	1.62	0.66
$TiO_2$	0.21	-
$Na_2O$	-	0.31
$SO_3$	0.07	2.51
<i>L. O. I</i>	0.77	1.18



شکل ۲ آنالیز xrd جهت بررسی ساختار بلوری پسماند شیشه مصرفی

جدول ۲ طرح های اختلاط مورد استفاده در این تحقیق

	سیمان ( $\frac{kg}{m^3}$ )	آب (lit)	پسماندشیشه ( $\frac{kg}{m^3}$ )	ماسه ( $\frac{kg}{m^3}$ )	لیکا ( $\frac{kg}{m^3}$ )	$\frac{W}{C}$ ( $\frac{lit}{m^3}$ )	$S_p$
<b>LWC<sub>0%</sub></b>	450	170	0	385	346	0.38	4.5
<b>LWC<sub>5%</sub></b>	427.5	173	22.5	385	346	0.40	4.2
<b>LWC<sub>10%</sub></b>	400.5	165	45	385	346	0.41	4
<b>LWC<sub>15%</sub></b>	382.5	157	67.5	385	346	0.41	3.8

گرفت تا میانگین نتایج آن ها به عنوان نتیجه اصلی برای هر سری ارائه گردد. جهت انجام آزمایش نفوذپذیری بتن (تحت فشار آب) نمونه های مکعبی ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتیمتر را بر طبق استاندارد BSEN-1230- 8:2000 تحت فشار ثابت 0.5MPa قرار داده بر طبق استاندارد سطحی از نمونه که با فشار بر آن اثر می کند با برس سیمی کمی زبر می شود پس از گذشت 72 ساعت نمونه ها به دو نیم تقسیم شده و مقدار نفوذ آب اندازه گیری می گردد.

### ۳- نتایج و بحث و بررسی

همانگونه که در شکل ۴، ملاحظه می گردد، نتایج حاصل از آزمایش فلو نشانگر این نکته است که افزایش میزان پسماند شیشه تاثیر چشم گیری در روانی ندارد. مقدار نتایج آزمایش فلو برای نمونه ها بلافاصله بعد از برداشتن مخروط در محدوده ای بین ۹،۵ تا ۹،۶cm بوده در صورتی که بعد از تکمیل فرایند آزمایش این اعداد روند کاهشی داشته اند.

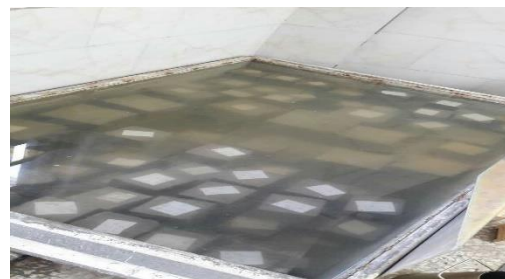
این نمودار برای بتن سبک شاهد عدد ۱۴،۱ cm، بتن سبک حاوی ۵٪ پسماند شیشه عدد ۱۲،۸ cm، بتن سبک حاوی ۱۰٪ پسماند شیشه ۱۳،۶۸ cm و برای بتن سبک حاوی ۱۵٪ پسماند شیشه عدد ۱۲،۳۱ cm را نشان می دهند. بررسی این اعداد نشانگر این است بتن سبک حاوی ۱۰٪ پسماند شیشه نسبت به بتن سبک شاهد دارای کمترین میزان کاهش یعنی به میزان ۲،۹٪ بوده در حالی که بتن سبک حاوی ۱۵٪ پسماند شیشه نسبت به بتن شاهد کاهشی معادل ۱۲،۶٪ و بتن حاوی پسماند شیشه نسبت به بتن شاهد کاهشی معادل ۹،۲٪ را نشان داده است. با این حال آنچه نتایج نشان می دهد، وجود پسماند شیشه تا حدودی سبب کاهش آب آزاد بتن می گردد. شکل ۴ و ۵ آزمایش میز فلو صورت گرفته بر روی بتن تازه را نشان می دهد.



شکل ۴ آزمایش میز فلو بر روی بتن تازه

### ۲-۳- ساخت نمونه ها

خصوصیات مخلوط، فرآیند تولید نمونه های آزمایش شامل انجام یک سری از آزمایش های اولیه است. اولین گام در ساخت نمونه ها مخلوط کردن سیمان و مصالح دانه ای می باشد که به مدت ۱ دقیقه و با سرعت ۸۰ rpm در دستگاه مخلوط کن مخلوط شدند. سپس پسماند شیشه و ۳۰ درصد آب در سرعت ۱۲۰ rpm به مخلوط اضافه شد و به مدت ۱ دقیقه مخلوط گردید. بعد از اختلاط مصالح مخلوط به مدت ۱،۵ دقیقه استراحت کرده و در نهایت روان کننده افزوده شده و به مدت ۲ دقیقه مصالح مخلوط شدند. برای رسیدن به اسلامپ مناسب روان کننده در مقادیر مختلف افزوده شد. سپس به منظور تعیین کارایی مخلوط تازه آزمایش میز فلو بر روی مخلوط انجام شد [25]. در نهایت نمونه ها در قالب های مکعبی در ابعاد 100 × 100 × 100 میلیمتر ریخته شده و عمل آوری شدند (شکل 3). عمل آوری نمونه ها در ۳ دوره زمانی ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده و برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شده است.



شکل ۳ عمل آوری نمونه ها

### ۲-۴- روند آزمایش

برای بررسی روانی و نسبت آب به سیمان مناسب ملات سیمان از آزمایش میز فلو استفاده شده است. برای انجام این آزمایش ملات در داخل مخروط ناقص ریخته شده بعد از گذشت ۳۰ ثانیه صفحه رویی را که به پایه پایینی متصل بوده وامکان بالا آمدن به میزان ۴۰ میلیمتر را دارد ۵ بار و هر بار به مدت ۴ ثانیه بلند کرده و سپس رها می گردد در انتها میزان پخش شدگی بتن در دو طرف میز اندازه گیری می گردد که نشان دهنده میزان روانی ملات استفاده شده می باشد.

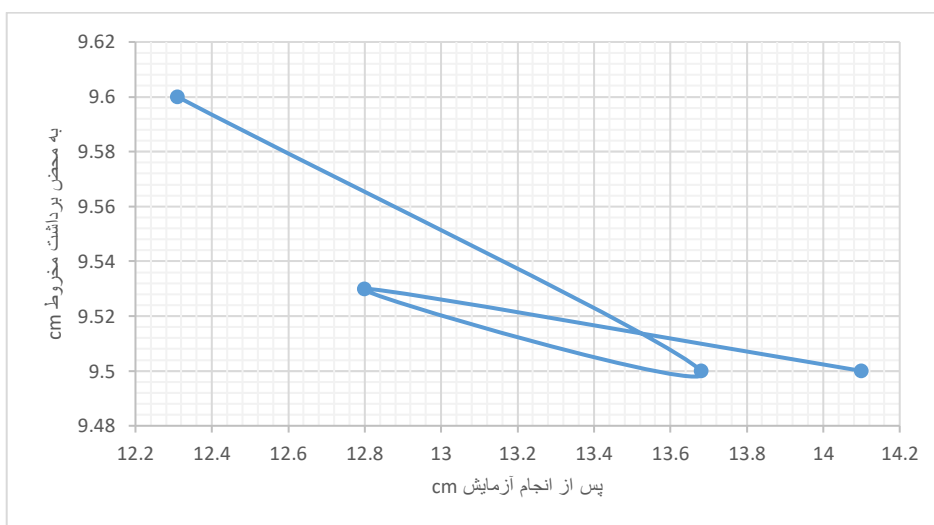
آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه ها طبق استاندارد ASTM C109 انجام شده است [26]. سن نمونه های آزمایش شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روز می باشد. برای هر سری ۳ نمونه مورد آزمایش قرار

جدول ۳ نتایج حاصله از آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه ها را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، در نمونه های حاوی پسماند شیشه نسبت به نمونه شاهد، با افزایش میزان پسماند شیشه نفوذپذیری افزایش می یابد. که بیانگر این حقیقت است که مقدار پسماند شیشه با نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد.

جدول ۳ نتایج آزمایش نفوذ پذیری (تحت فشار آب)

ضریب نفوذ پذیری $k(m/s)$	
$LWC_{15\%}$	$4.63 \times 10^{-7}$
$LWC_{10\%}$	$4.50 \times 10^{-7}$
$LWC_{5\%}$	$4.10 \times 10^{-7}$
$LWC_{0\%}$	$3.60 \times 10^{-7}$

همانطور که مشاهده می شود ضریب نفوذ پذیری بتن سبک حاوی ۵٪ پسماند شیشه نسبت به بتن سبک شاهد افزایش ۱۳٫۸٪ داشته که این افزایش برای نمونه های حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ پسماند شیشه به ترتیب اعداد ۲۴٫۹٪ و ۲۶٫۶٪ می باشد. خاطر نشان می شود که آزمایش نفوذپذیری بتن در مقابل آب در حقیقت کیفیت نفوذناپذیری بتن را نشان می دهد و با اینکه طبق نتایج بدست آمده می توان گفت نفوذ در برابر آب در بتن افزایش پیدا کرده اما این مسئله با توجه به کاهش هزینه در مصرف سیمان و مدیریت پسماند قابل توجیه بوده و صرفه اقتصادی به همراه خواهد داشت.



شکل ۵ نتایج آزمایش میز فلو

اشکال ۶ الی ۹ نشان دهنده مقاومت فشاری نمونه ها با درصد های ۵۰، ۱۰ و ۱۵ درصد پسماند شیشه می باشند. با مقادیری که از مقاومت نمونه ی بتن شاهد در سنین ۲۸ روزه و بقیه نمونه ها حاصل گردید می توان به این نتیجه رسید که افزایش میزان پسماند شیشه تا حدودی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است البته همچنان نمونه ها در محدوده استاندارد باقی مانده اند.

در شکل ۶ میزان مقاومت فشاری برای ۳ عدد نمونه ی بتن سبک شاهد در سن ۷ روز شامل ۲۸، ۲۷، ۲۸، ۲۸، ۲۸ و ۲۸ برای نمونه های ۲۸ روزه شامل ۳۱، ۳۱، ۳۲، ۳۲، ۳۱، ۳۲ و ۳۲ برای نمونه های ۹۰ روزه شامل اعداد ۳۶، ۳۵، ۳۵، ۳۶، ۳۶ می باشد. در شکل ۷ میزان مقاومت فشاری برای ۳ عدد نمونه ی بتن سبک حاوی ۵٪ پسماند شیشه در سن ۷ روز شامل اعداد ۲۶، ۲۷، ۲۷، ۲۵ و ۲۶ برای نمونه های ۲۸ روزه شامل اعداد ۳۱، ۳۱، ۳۱، ۳۲ و ۳۱، ۳۱، ۳۱، ۳۲ و ۳۳ برای نمونه های ۹۰ روزه شامل اعداد ۳۳، ۳۳، ۳۳ و ۳۳ می باشد. همانطور که مشاهده می گردد در مجموع نمونه های حاوی ۵٪ پسماند شیشه نسبت به نمونه های بتن شاهد با کاهش میزان مقاومت فشاری به میزان ۷، ۵٪ و ۲، ۳٪ و ۹، ۵٪ به ترتیب برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز مواجه شده اند.

در شکل ۸ میزان مقاومت فشاری بتن سبک حاوی ۱۰٪ پسماند شیشه برای ۳ عدد نمونه در سن ۷ روزه اعداد ۲۶، ۲۶، ۲۶ و ۲۷ برای

سنین ۲۸ و ۹۰ روز نیز به ترتیب عددهای ۳۰، ۳۰، ۳۰، ۳۱، ۳۱، ۳۱ و ۳۲، ۳۲، ۳۲، ۳۲، ۳۲، ۳۲ می باشد. این اعداد نشان می دهند که در مجموع مقاومت بتن های سبک حاوی ۱۰٪ پسماند شیشه در سنین ۲۸ و ۹۰ به ترتیب کاهشی معادل ۴، ۷٪ و ۴، ۵٪ و ۱۰ درصدی داشته اند. شکل ۹ نیز میزان مقاومت فشاری نمونه های بتنی حاوی ۱۵٪ پسماند شیشه را نشان می دهد که برای نمونه های ۷ روزه این اعداد شامل ۲۳، ۲۳، ۲۳، ۲۳ و ۲۳ برای نمونه های ۲۸ روزه شامل ۲۸، ۲۸، ۲۸، ۲۸ و ۲۸ و ۲۸، ۲۸، ۲۸، ۲۸ و ۲۸ برای نمونه های ۹۰ روزه بصورت ۳۰، ۳۰، ۳۰، ۳۰ و ۳۰ می باشد و در مجموع نمونه های ۷ روزه با کاهش مقاومت فشاری در حدود ۱۷، ۷٪ و برای سایر نمونه ها در سنین ۲۸ و ۹۰ این اعداد به ترتیب شامل ۱۱، ۷٪ و ۱۸، ۵٪ هستند.

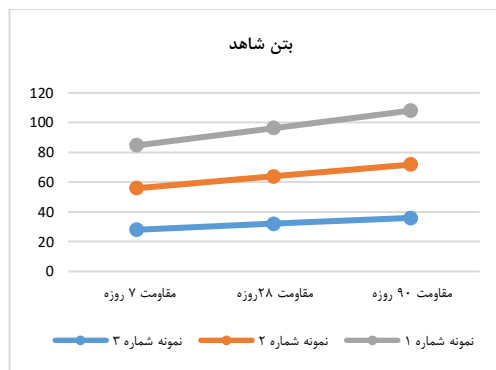
به طور میانگین می توان گفت با بررسی نتایج برای نمونه های ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب با کاهش ۹، ۹۶٪ و ۶، ۶۶٪ درصدی مقاومت در آزمایشات انجام گرفته مواجه بوده ایم. با توجه به اینکه مقاومت نمونه ها با اضافه نمودن مواد بازیافتی (پسماند شیشه) همچنان در محدوده استاندارد بتن سبک سازه ای باقی مانده اند، می توان از پسماند شیشه با هدف کاهش مواد اولیه در بتن سبک استفاده نمود.

با مقایسه‌ی نتایج می‌توان دریافت که با افزایش درصد پسماند شیشه در بتن سبک مقاومت آن‌ها کاهش می‌یابد. کاهش میزان مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی ۵٪ پسماند شیشه به طور میانگین ۶۴٪ و برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ پسماند شیشه این عدد با اختلاف جزئی از عدد قبلی ۶۴٪ بوده در حالی که این مقدار برای نمونه‌های حاوی ۱۵٪ کاهش ۹۷،۱۵ درصدی را نشان می‌دهد.

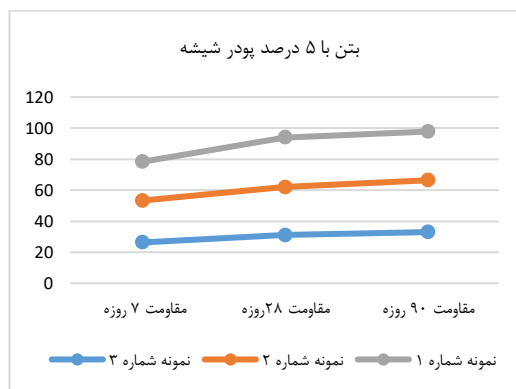
با توجه به شکل ۱۰ کاملاً مشهود است که استفاده از ۵ درصد پسماند شیشه در بتن سبک بالاترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد. میزان مقاومت فشاری با توجه به افزایش زمان تا حدودی کاهش یافته و تغییرات این نمودار به صورتی بوده که در سنین ۲۸ روز از آزمایش کمترین میزان میانگین کاهش مقاومت فشاری را نسبت به بتن سبک شاهد داشته یعنی به میزان ۶،۱۶٪ پس از نمونه‌های ۵ روزه نمونه‌های ۷ روزه کاهش کمتری یعنی ۹،۹۶٪ را نسبت به بتن شاهد نشان می‌دهند و در نهایت نمونه‌های ۹۰ روزه با کاهش ۱۲،۶۶ درصدی کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به سایر نمونه‌ها گزارش می‌کنند. با این وجود کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده همچنان در محدوده استاندارد بوده و با توجه به سودمندی‌های حاصل از جایگزینی پسماند شیشه ضایعاتی به جای سیمان و فواید محیط زیستی قابل توجهی بنظر می‌رسد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

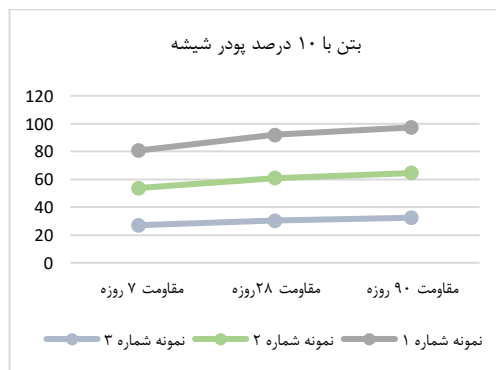
در این پژوهش سعی بر این شد تا مقاومت فشاری و نفوذ بتن پایدار سبک حاوی پسماند شیشه ضایعاتی در محیط آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در بتن ساخته شده با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان با پسماند شیشه نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری و نفوذپذیری قرار گرفتند. نتایج حاصله از این تحقیق نشان داد، استفاده از پسماند شیشه در بتن تا ۱۵ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. لازم به ذکر است که جایگزینی بیش از ۱۵ درصد سیمان با پسماند شیشه سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. جایگزینی پسماند شیشه با سیمان تاثیر آنچنانی بر کارایی بتن ندارد، همچنین استفاده از پسماند شیشه در بتن سبب افزایش نفوذپذیری بتن می‌شود. طبق نتایج به دست آمده میزان نفوذپذیری با مقدار پسماند شیشه رابطه مستقیم دارد. در نهایت می‌توان گفت با توجه به عوارض زیست محیطی تولید سیمان و استفاده از آن در صنعت ساختمان، جایگزینی آن با مصالح مناسب ضروری می‌باشد و استفاده از پسماند شیشه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان، هرچند اندک باشد.



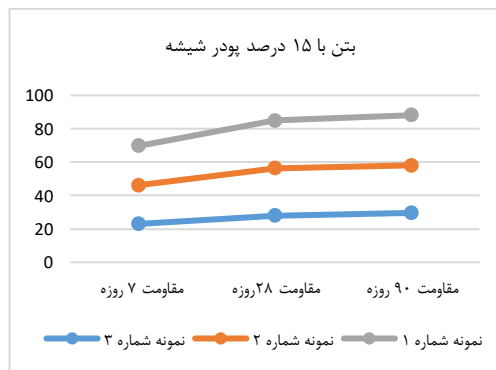
شکل ۶ نمودار مقاومت بتن سبک شاهد



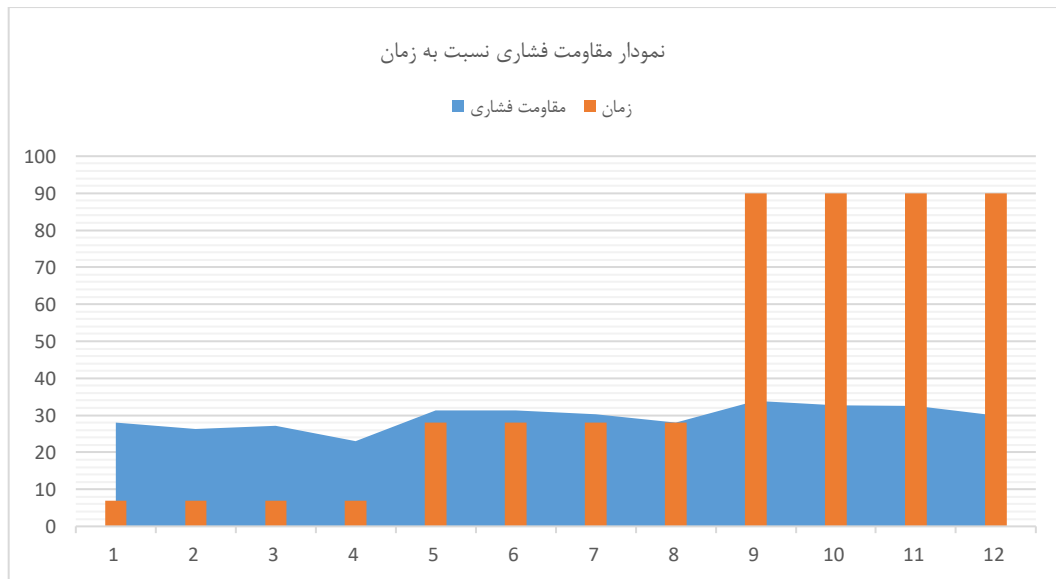
شکل ۷ مقاومت بتن سبک با ۵ درصد پودر شیشه



شکل ۸ مقاومت بتن سبک با ۱۰ درصد پسماند شیشه



شکل ۹ مقاومت بتن سبک با ۱۵ درصد پودر شیشه



شکل ۱۰ نمودار مقاومت فشاری نسبت به زمان

with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2019 Jan 30;196:443-56.

- [14] Badogiannis EG, Christidis KI, Tzanetatos GE. Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2019 Jan 30;196:443-56.
- [15] de Alencar Monteiro VM, Lima LR, de Andrade Silva F. On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 2018 Nov 10;188:280-91.
- [16] Wang D, Ju Y, Shen H, Xu L. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*. 2019 Feb 10;197:464-73.
- [17] Akand L, Yang M, Wang X. Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2018 Feb 28;163:32-9.
- [18] Ramdani S, Guettala A, Benmalek ML, Aguiar JB. Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder. *Journal of Building Engineering*. 2019 Jan 1;21:302-11.
- [19] Omran AF, Etienne D, Harbec D, Tagnit-Hamou A. Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. *Construction and Building Materials*. 2017 Mar 15;135:43-58.
- [20] Hendi A, Mostofinejad D, Sedaghatdoost A, Zohrabi M, Naeimi N, Tavakolinia A. Mix design of the green self-consolidating concrete: Incorporating the waste glass powder. *Construction and Building Materials*. 2019 Feb 28;199:369-84.
- [21] He ZH, Zhan PM, Du SG, Liu BJ, Yuan WB. Creep behavior of concrete containing glass powder. *Composites Part B: Engineering*. 2018 Nov 30.
- [22] Omran A, Tagnit-Hamou A. Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*. 2016 Apr 15;109:84-95.
- [23] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, Annual book of ASTM Standards, 2000. 4.01,186-189.
- [24] ASTM C494. Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual Book of American Society for Testing Materials Standards. 2010;4.
- [25] Astm C192/C192M-13, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, pp. 1-8.
- [26] ASTM C. 642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual book of ASTM standards. 2006;4:02.

## ۵- مراجع

- [1] Taherkhani, R.; Saleh, A.L.; Mansur, S.A.; Nekooie, M.A.; Noushiravan, M.; Hamdani, M. 2012. "A Systematic Research Gap Finding Framework: Case Study of Construction Management", *J. Basic Appl. Sci. Res.* 2: 5129-5136.
- [2] Zandiye, Keyvan, Roohollah Taherkhani, and Reza Ziaie Moayed. 2016. "History of Safety in Iranian Construction Industry (in Farsi)", *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)* 1(1): 13-20.
- [3] Taherkhani, R. 2013. "Development of a Social Sustainability Model in Industrial Building System (IBS)", *Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia*.
- [4] Hosseini, P. et al. 2011. "Toward Green Revolution in Concrete Industry: The Role of Nanotechnology (A Review)." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5(12).
- [5] Taherkhani, R., 2014. A Strategy towards Sustainable Industrial Building Systems (IBS): The Case of Malaysia. *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol.* 1, 86-90.
- [6] Kotwal AR, Kim YJ, Hu J, Sriraman V. Characterization and early age physical properties of ambient cured geopolymer mortar based on class C fly ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015 Mar 1;9(1):35-43.
- [7] George A, Sofi A. Torsional Strengthening Of Normal Weight Concrete And Light Weight Concrete Using Steel Fibres. *Materials Today: Proceedings*. 2017 Dec 31;4(9):9846-50.
- [8] Hooi LS, Min PJ. Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete. *Procedia engineering*. 2017 Jan 1;171:633-9.
- [9] Xu S, Xie N, Cheng X, Huang S, Feng L, Hou P, Zhu Y. Environmental resistance of cement concrete modified with low dosage nano particles. *Construction and Building Materials*. 2018 Mar 10;164:535-53.
- [10] Aydın AC, Nasl VJ, Kotan T. The synergic influence of nano-silica and carbon nano tube on self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*. 2018 Nov 1;20:467-75.
- [11] Ismael R, Silva JV, Carmo RN, Soldado E, Lourenço C, Costa H, Júlio E. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on steel-to-concrete bonding. *Construction and Building Materials*. 2016 Oct 30;125:1080-92.
- [12] Qin Y, Zhang X, Chai J, Xu Z, Li S. Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2019 Jan 10;194:216-25.
- [13] Badogiannis EG, Christidis KI, Tzanetatos GE. Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced