

اثر جایگزینی ماسه با ضایعات شیشه بر مقاومت کششی و خمشی بتن خودتراکم

یاسر شریفی^۱، محمود هوشیار^۲، بهنام عاقبتی^۲، جمال ارسن^۲

۱. استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

Email: yasser_sharifi@yahoo.com (y.sharifi@vru.ac.ir)

کد پذیرش چکیده مقاله: 127-2F

کدمقاله: G

چکیده:

در سال‌های اخیر بتن خودتراکم کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های بتنی مسلح با شرایط قالب‌بندی سخت پیدا کرده است. این بتن قابلیت جاری شدن تحت اثر وزن خود و عبور از میان آرماتورها و دستیابی به تراکم را داراست. در این تحقیق آزمایشگاهی با جایگزینی ماسه با خرده شیشه‌های ضایعاتی، تاثیر آن را روی خواص بتن تازه خود تراکم و همچنین خصوصیات خمشی بتن خود تراکم سخت شده را مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این پژوهش ۴ طرح اختلاط با درصدهای مختلف شیشه ارائه شده است. به گونه‌ای که شیشه با ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ریزدانه جایگزین ماسه می‌شود. آزمایش‌های جریان اسلامپ، جعبه L، حلقه J و قیف V برای اندازه‌گیری روانی و کارایی بتن تازه برای همه طرح‌ها مورد سنجش قرار می‌گیرند. برای بررسی مقاومت‌های کششی و خمشی طرح‌ها سه نمونه استوانه‌ای به ابعاد (۱۵×۳۰) سانتی‌متر و سه نمونه تیر خمشی به ابعاد (۱۰×۱۰×۵۰) سانتی‌متر برای هر طرح ساخته و تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شیشه ضایعاتی مقاومت‌های کششی و خمشی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شیشه ضایعاتی، مقاومت خمشی، بتن خودتراکم، بتن تازه.

Abstract:

In recent years, self-compacting concrete use in concrete structures reinforced with hard formatting conditions widely. The ability of concrete to flow under its own weight, pass through the reinforcement And achieve the density. The aim of the present study is to investigate the effect of glass replacement with fine aggregate on the SCC properties. In this study, four kinds of sand replaced by glass at volume with replacement ratio of 0%, 10%, 20%, 30%. Various tests have been done in this experimental work to examine the fresh properties for mixes compositions. Slump flow, L-box, J-ring and V-funnel will perform for determination the fresh self-compatibility properties. In this research work, the following tests on hardened concrete were carried out: Flexural and Splitting tensile strengths. For each concrete mix, three (15×30 cm) cylinders were cast to determine the tensile strength and Three beams of dimensions (10×10×50 cm) were cast to determine the flexural strength. The results of the experiments show that the Flexural and tensile strengths decreased with the increase of the percentage of waste glass replacement in concrete.

Keywords: Recycle glass, Flexural strength, Self-compacting Concrete, Fresh concrete

۱. مقدمه

بتن به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود که استفاده از آن هم‌چنان در حال افزایش است، با توسعه روزافزون کارهای بتنی، اقتصاد، مقاومت و کیفیت آن اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. در جامدات رابطه معکوس بین تخلخل و مقاومت یک اصل است، برای کاهش تخلخل و ایجاد یک بتن متراکم و همگن برای بتن معمولی از روش‌های مختلف تراکم استفاده می‌شود. که با توجه به کمبود نسبی کارگران ماهر و یا سهل‌انگاری‌های آنان در کارگاه و یا بالا بودن هزینه و بهره‌بردار، در هنگام ریختن بتن در قالب، به ویژه در مناطقی که تراکم میلگرد وجود دارد، عمل لرزاندن بطور کامل و صحیح انجام نگرفته و در نهایت مشخصات مکانیکی مطلوب بتن حاصل نمی‌شود. لذا ساخت بتنی بدون نیاز به لرزاندن همواره راه حلی برای این معضل به نظر می‌رسید و از این رو ساختن چنین بتنی رویایی برای تکنولوژیست‌های بتن بوده است که بتوانند با استفاده از مواد شیمیایی مختلف و تغییر در مقادیر مصالح طرح اختلاط، به این مهم دست یابند و بتن را از نقص اجرایی لرزاندن رها سازند. ابداع بتن خودتراکم^۱ نتیجه این تلاش‌ها بوده است که اهمیت و لزوم استفاده از این بتن توسط اکامورا^۲ در سال ۱۹۸۶ کشف شد. و همچنین تحقیقات بسیاری به منظور بررسی کارایی بتن خودتراکم توسط ازوا^۳ و همکاران در دانشگاه توکیو انجام شد که اولین نمونه ساخته شده که در آن از مصالح موجود در بازار استفاده شده بود در سال ۱۹۸۹ به اتمام رسید [۱]. همچنین پیشرفت صنعت و گرایش کشورها به صنعتی شدن علاوه بر محاسنی که این پیشرفت در رشد اقتصادی کشورها داشته است، مشکلاتی از جمله افزایش ضایعات بجا مانده ناشی از تولیدات صنعتی را به ارمغان آورده است که عدم توجه به این امر معضلات بزرگی را راجع به محیط زیست بوجود خواهد آورد. از جمله این ضایعات، ضایعات بجا مانده از محصولات شیشه‌ای می‌باشد.

امروزه با توجه به اینکه عملیات بازیافت شیشه با مصرف هزینه و انرژی همراه است، محققین را بر آن داشت که با کم‌ترین هزینه و مصرف انرژی، استفاده بهینه را از این ضایعات انجام دهند. از آنجا که مقادیر زیادی از این ضایعات را می‌توان در بتن جایگزین نمود، استفاده از ضایعات شیشه در بتن معمولی مورد توجه محققین قرار گرفته است. ریندل^۴ در تحقیقی عنوان نمود که پودر شیشه^۵ (اندازه رد شده از الک با سایز ۲۰۰) می‌تواند همانند یک ماده پوزولانیک عمل نماید تا تمایل مصالح دانه‌بندی شده واکنش پذیر را در مقابل واکنش سیلیسی - قلیایی^۶ کاهش دهد [۲]. بعلاوه شایان و زو^۷ نشان داده‌اند که حداکثر ۳۵٪ از براده شیشه می‌تواند به همراه سیمانی با قلیایی پایین، بدون تاثیرات زیان آور در بتن مورد استفاده شود [۳]. نتایج تحقیق مرکز توسعه و تحقیق انرژی نیویورک در مورد استفاده از شیشه بازیافت شده در بلوکهای بنایی بتنی نشان می‌دهد که ضایعات شیشه می‌تواند به عنوان هر دو مصالح درشت‌دانه و ریزدانه در تهیه بتن مورد استفاده قرار گیرد [۴].

مطابق استاندارد ASTM C618 [۵] پوزولان‌ها؛ موادی سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی هستند که به خودی خود ارزش سیمانی شدن ندارند اما به صورت پودر شده و در مجاورت رطوبت و در دماهای معمولی به هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را که دارای خواص سیمانی شدن می‌باشند به وجود می‌آورند. بهبود کیفیت خمیر سیمان، افزایش حجم تولید سیمان بدون کاهش کیفیت بلکه ارتقای آن، کاهش مصرف انرژی، کمک به کاهش آلودگی هوا و کمک به حفظ محیط زیست انگیزه‌های مصرف پوزولان‌ها از جمله شیشه می‌باشند. شیشه از نظر ساختار مولکولی در حالت جامد آرایش نامنظم دارد و در درجه حرارت‌های بالا شیشه مثل هر ماده دیگری عمل می‌کند. اما کاهش دما باعث می‌شود که مولکول‌ها نتوانند در آرایشی که مورد نیاز بلور است قرار گیرند. و بدین ترتیب شیشه از نظر ساختار مولکولی مانند مایعات نامنظم بوده و غیر متحرک است. سه ماده کربنات، و دو سود سنگ آهک و سیلیس مواد اصلی تشکیل دهنده شیشه هستند. مواد شیشه‌ساز مورد تایید موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران عبارتند از سیلیس، دی اکسید بور و پنتا اکسید فیر که از هر کدام به تنهایی می‌توان شیشه را تهیه کرد [۶]. نگرانی بزرگی که در استفاده از شیشه در بتن وجود دارد، واکنش شیمیایی ما بین ذرات سیلیس اشباع شیشه و قلیایی‌های مخلوط بتن است که به واکنش سیلیسی - قلیایی معروف است. این واکنش می‌تواند برای پایداری بتن بسیار خطرناک باشد، به همین منظور باید پیشگیری مناسبی در جهت کمتر کردن اثر این واکنش انجام شود. پیشگیری مناسب می‌تواند با استفاده از یک ماده پوزولانی مناسب مانند: خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و یا میکروسیلیس با نسبت مناسب در مخلوط بتن انجام گیرد. حساسیت شیشه به مواد قلیایی این حدس را بوجود می‌آورد که شیشه درشت و فیبر شیشه می‌تواند

¹ Self-compacting Concrete

² Okamura

³ ozawa et al

⁴ Reindel

⁵ Glass Powder

⁶ Alkali-Silica Reaction

⁷ Shayan Aimin , Xu

اثر واکنش سیلیسی-قلیایی را کم و یا محو کند. این تصور وجود دارد که پودر شیشه می‌تواند خواص پوزولانی، مانند مواد ذکر شده در بالا، از خود نشان دهد و از اثرات و انجام واکنش سیلیسی-قلیایی توسط دانه‌های شیشه جلوگیری کند [۷]. در این مقاله، نتایج یک پژوهش آزمایشگاهی در زمینه استفاده از شیشه‌های ضایعاتی در بتن خودتراکم ارائه شده است. در این تحقیق از شیشه‌های ضایعاتی که برای استفاده مجدد در چرخه تولید مناسب نیستند به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه و همچنین به عنوان ماده پرکننده استفاده شده است. با توجه به گزارش‌های متنوع در ارتباط با جایگزینی دانه‌بندی با شیشه‌های ضایعاتی در بتن‌های معمولی، نیاز به ارائه تحقیق‌های کامل در ارتباط با بتن‌های خودتراکم اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. به این منظور این گزارش می‌تواند سرآغاز تحقیق‌های مفصل‌تر باشد.

۲. مشخصات مصالح مصرفی

۲.۱. سیمان

سیمان مصرفی در ایران معمولاً سیمان پرتلند، تیپ ۲ می‌باشد که مهمترین ویژگی آن مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها و نمک‌هاست. سیمان مصرفی در این آزمایش محصول کارخانه سیمان ممتازان کرمان است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که زمان گیرش سیمان تیپ ۲ همانند سیمان معمولی (تیپ ۱) می‌باشد و چون در بسیاری از کارخانه‌های تولید سیمان در ایران این نوع سیمان تولید می‌شود بنابراین در تحقیق حاضر از این نوع سیمان استفاده شده و همچنین بدلیل استفاده از مواد پوزولانی دیگر مانند میکروسیلیس، سیمان معمولی مانع کارایی مناسب بتن خودتراکم می‌شود.

۲.۲. سنگ‌دانه

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها عامل تعیین‌کننده‌ای در مقدار کارایی مخلوط بتن است. کارایی به نوبه خود بر مقدار آب و سیمان لازم در مخلوط اثر می‌گذارد، جداشدگی و آب انداختن بتن را کنترل می‌کند و بر نحوه جای‌دهی و پرداخت سطح بتن اثر دارد. بنابراین دانه‌بندی سنگ‌دانه در تعیین نسبت مواد تشکیل دهنده مخلوط بتن اهمیت بسیار زیادی دارد. سنگ‌دانه مورد استفاده مطابق دانه‌بندی جدول ۳ با حداکثر قطر اسمی ۱۲٫۵ میلی‌متر انتخاب گردیده است. ریزدانه از نوع ماسه شسته معمولی و درشت‌دانه از نوع شکسته از مصالح معادن شهر رفسنجان بوده و فیلر مصرفی پودر سنگ‌های آهکی تولید شهر قم می‌باشد. خواص فیزیکی سنگ‌دانه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

۲.۳. شیشه‌ی ضایعاتی

استفاده از ضایعات شیشه در بتن کمک زیادی به حفظ محیط زیست و استفاده مجدد از موادی می‌کند که بنابر دلایلی از جمله صرفه‌ی اقتصادی دیگر قابلیت استفاده در صنعت شیشه را نخواهد داشت. استفاده از دانه‌های شیشه که دارای ترکیب قابل اطمینانی بوده و با توجه به اینکه به راحتی در دسترس می‌باشند از نظر اقتصادی استفاده از آنها نیز مقرون به صرفه است. با در نظر گرفتن مزایای ذکر شده و استفاده از تمهیدات ممکن برای به حداقل رساندن معایب، استفاده از شیشه برای بخش‌هایی از صنعت ساختمان‌سازی علاوه بر اینکه به اقتصاد پروژه‌های ساختمانی کمک می‌کند، مزایای استفاده از آن به بهبود کیفیت برخی ساختارهای بتن و ساختمان کمک خواهد کرد. خواص شیمیایی آن در جدول ۵ نشان داده شده است.

۲.۴. میکروسیلیس

یکی از واکنش‌های مخرب در اثر استفاده از شیشه در بتن واکنش سیلیسی-قلیایی است که یکی از راه‌های مقابله با آن استفاده از مواد پوزولانی از جمله میکروسیلیس می‌باشد که در مواد اولیه طرح اختلاط بتن لحاظ شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس مورد استفاده در جدول ۶ نشان داده شده است.

۲.۵. آب

آب مورد استفاده در طرح اختلاط بتن، آشامیدنی است.

۲.۶. فوق روان کننده

یکی از عوامل مهم در ایجاد واکنش سیلیسی-قلیایی وجود رطوبت است که استفاده از فوق روان کننده می تواند به کاهش نسبت آب به سیمان و در نهایت کاهش نفوذپذیری منجر شود. برای دستیابی به این منظور از فوق روان کننده با نام تجاری سوپر ویسکوز^۱ که محصول شرکت نامیکاران می باشد، استفاده شده است. خواص شیمیایی این نوع فوق روان کننده در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۱- خواص شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات سیمان ممتازان	استاندارد ایران	مشخصات شیمیایی سیمان
1.40 ± 0.10	Max 5.00	(MgO) %
21.20 ± 0.40	Min 20.00	(SiO ₂) %
4.60 ± 0.20	Max 6.00	(Al ₂ O ₃) %
3.80 ± 0.10	Max 6.00	(Fe ₂ O ₃) %
6.00 ± 0.50	Max 8.00	(C ₃ A) %
2.45 ± 0.20	Max 3.00	(SO ₃) %
1.00 ± 0.20	Max 3.00	(L.O.I) %
0.50 ± 0.20	Max 0.75	(I.R) %

جدول ۲- خواص فیزیکی سیمان مصرفی

مشخصات سیمان ممتازان	استاندارد ایران	مشخصات فیزیکی سیمان
0.6±0.3	-	R.S # 170
3100±100	Min 2800	سطح مخصوص (cm ² /g)
125±10	Min 45	زمان گیرش بحرانی
170±15	Min 360	نهایی
0.16±0.07	Min 0.8	آزمایش اتوکلاو
-	-	مقاومت فشاری ۲روزه
230±15	Min 100	۳روزه
330±20	Min 175	۷روزه
450±20	Min 315	۲۸روزه

جدول ۳- دانه بندی مورد استفاده در طرح اختلاطها

درصد تجمعی عبوری هر الک	درصد مانده روی هر الک	ریز دانه (mm)	درصد تجمعی عبوری هر الک	درصد مانده روی هر الک	درشت دانه (mm)
98.50	1.5	4.75	95.00	5	12.5
78.00	20.5	2.36	50.00	45	9.5
49.00	29	1.18	0.00	50	4.75
26.00	23	0.6			
8.00	18	0.3			
1.50	6.5	0.15			
0.00	1.5	0.75			

استفاده از پودر سنگ

استفاده از پودر سنگ

¹ Super Viscose 1

جدول ۴- خواص فیزیکی سنگ دانه ها

خصوصیات فیزیکی سنگدانه	مدول نرمی ماسه	4.39
وزن مخصوص انبوهی درشت دانه		1.73(gr/cm ³)
وزن مخصوص انبوهی ریز دانه		1.77(gr/cm ³)
درشت دانه		
وزن مخصوص ظاهری ناخالص		2.786
وزن مخصوص ظاهری درصد جذب آب		2.639 5.59
ریز دانه		
وزن مخصوص ظاهری ناخالص		3.06
وزن مخصوص ظاهری (%) درصد جذب آب		2.969 3.06

جدول ۵- خواص شیمیایی شیشه ضایعاتی

ترکیب شیمیایی	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Mgo	Cao	AL ₂ O ₃	SiO ₂
%	0-1	12-16	3-6	5-12	1-3	69-74

جدول ۶- خواص فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس

خصوصیات فیزیکی	رنگ	خاکستری روشن
	اندازه ذره (micron)	35
	چگالی حجمی (ton/m ³)	1.2
خصوصیات شیمیایی	SiO ₂	97.59
	Cao	0.26
	Mgo	0.13
	AL ₂ O ₃	0.37
	Na ₂ O	0.10
	P ₂ O ₅	0.11
	Fe ₂ O ₃	0.73
	K ₂ O	0.06
	L.o.I	0.60

جدول ۷- خواص فوق‌روان‌کننده

قهوه‌ای روشن	رنگ	خصوصیات فیزیکی و شیمیایی
ترکیبات پلیمری	پایه شیمیایی	
0%	یون کلرید	
1.05±.02	چگالی (kg/lit)	
5±1	PH	
0%	دوده	

۳. نحوه آزمایش‌ها

۳.۱. طرح اختلاط

جهت بررسی اثر شیشه ضایعاتی در مخلوط بتن خودتراکم از چهار نوع طرح اختلاط استفاده شده است که به ترتیب ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد شیشه ضایعاتی جایگزین ماسه شده است. در تحقیق حاضر نمونه‌های استوانه‌ای (۱۵×۳۰) سانتیمتری برای آزمایش مقاومت کششی و همچنین از نمونه‌های تیر خمشی (۱۰×۱۰×۵۰) سانتیمتری برای آزمایش مقاومت خمشی استفاده شده است. نمونه‌های خمشی و کششی بعد از عمل‌آوری ۲۸ روزه تحت آزمایش‌های خمشی و کششی قرار گرفته است. طرح اختلاط‌های بکار رفته در این تحقیق در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- طرح اختلاط مورد استفاده

فوق روان‌کننده (Liter)	آب (kg/m ³)	شیشه ریزشده (kg/m ³)	میکروسیلیس	سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	طرح اختلاط
8.28	169.2	0	18	360	850	690	SC1
8.28	169.2	76.91	18	360	773.09	690	SC2
9.72	169.2	153.84	18	360	696.16	690	SC3
10.44	169.2	230.78	18	360	619.22	690	SC4

۳.۲. آزمایش‌های کارایی بتن

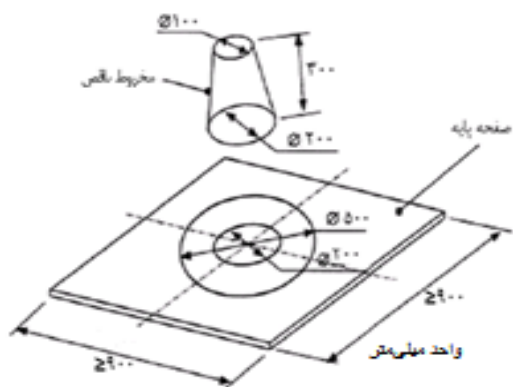
برای اندازه‌گیری کارایی بتن خودتراکم در حالت بتن تازه چند آزمایش توسط آیین‌نامه‌های مختلف بیان شده است که به امکانات آزمایشگاهی موجود، آزمایش‌های زیر انجام شد:

۱- آزمایش حلقه J (J Ring) که از یک حلقه تشکیل شده است و زیر آن توسط میلگردهایی محاط شده است و بتن تازه در داخل یک مخروط ناقص در درون حلقه ریخته می‌شود و پس از برداشتن این مخروط بتن جریان یافته و با عبور از میلگردها ساکن می‌شود و پس از سکون دو قطر و همچنین ارتفاع بتن در داخل حلقه و خارج از آن برداشت می‌شود و نسبت ارتفاع خارج به ارتفاع داخل اندازه‌گیری شده و به عنوان یکی از پارامترهای آزمایش آورده می‌شود (شکل ۱).

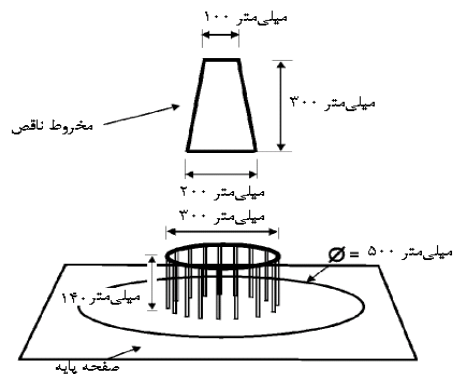
۲- آزمایش جریان اسلامپ (Slump Flow) همانند تست اسلامپ بتن معمولی، بتن در یک مخروط ناقص ریخته می‌شود و پس از برداشتن مخروط ناقص بتن جریان می‌یابد و بطور کامل در سینی اسلامپ پخش می‌شود، برخلاف بتن معمولی که شکل خود را تقریباً حفظ می‌کند، در این حالت دو قطر بتن پخش شده و زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری و بعنوان پارامترهای این آزمایش بدست می‌آید (شکل ۲).

۳- آزمایش V (V Funnel) در این آزمایش بتن تازه در یک قیف خاص ریخته می‌شود که کف آن بسته است و پس از پر شدن قیف و گذشت ۱۰ ثانیه دریچه کف قیف باز می‌شود و مدت زمانی که طول می‌کشد تا بتن از قیف خارج شود اندازه‌گیری و بعنوان پارامتر این آزمایش معرفی می‌شود (شکل ۳).

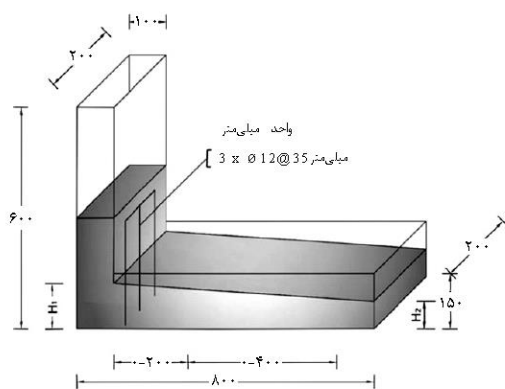
۴- آزمایش L (L Box)، در این آزمایش قسمت بالایی جعبه که پایین آن توسط دریچه‌ای بسته شده است با بتن پر می‌شود و پس از گذشت زمان یک دقیقه دریچه پایینی باز شده و در حالی که جلو دریچه چند میلگرد قرار گرفته است بتن جریان پیدا می‌کند و در قسمت افقی جعبه حرکت می‌کند تا ساکن شود و برای این آزمایش زمان برای رسیدن بتن به فاصله ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری دریچه در قسمت افقی و همچنین نسبت ارتفاع بتن در ابتدای جعبه به ارتفاع بتن در انتهای جعبه پس از ساکن شدن یادداشت می‌شود (شکل ۴).



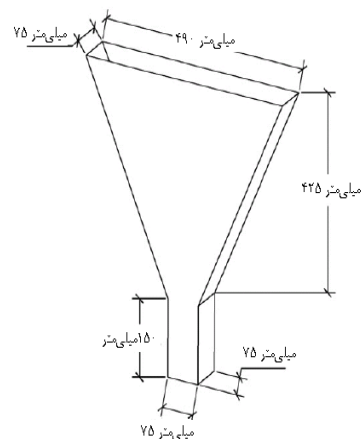
شکل ۲: آزمایش Slump Flow



شکل ۱: آزمایش J Ring



شکل ۴: آزمایش L Box



شکل ۳: آزمایش V Funnel

۳.۳. ساخت و نگهداری نمونه‌ها

تمامی گام‌های اجرای تحقیق حاضر مانند ساخت نمونه‌ها، کلیه طرح اختلاط‌ها، قالب‌ها و شرایط آزمایشگاهی با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ مطابقت دارد. برای استفاده از شیشه ضایعاتی در بتن، آن را به قطعات کوچکتری تبدیل نموده و سپس از سری الک‌های با اندازه (۰/۳، ۰/۶، ۱/۱۸، ۲/۳۶، ۴/۷۵، ۹/۵، ۱۲/۵) میلی‌متر رد می‌شوند. در این تحقیق از ۴ طرح اختلاط استفاده شده که نمونه‌های یکی از طرح اختلاط‌ها به عنوان نمونه شاهد و در سه طرح اختلاط دیگر از شیشه ریزدانه با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین ماسه استفاده شده است (شکل ۵). پس از آماده شدن ملات بتن نمونه‌های استوانه‌ای (برای آزمایش مقاومت کششی) در ابعاد (۱۵×۳۰) سانتی‌متر به تعداد سه عدد برای هر طرح اختلاط و نمونه‌های تیر خمشی (برای آزمایش مقاومت خمشی) در ابعاد (۵۰×۱۰×۱۰) سانتی‌متر به تعداد سه عدد برای هر طرح اختلاط ریخته شدند (شکل ۶). نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و سپس نمونه‌ها از قالب خارج شدند. نمونه‌های استوانه‌ای (برای آزمایش مقاومت کششی) و تیر خمشی (برای آزمایش مقاومت خمشی) تا سن ۲۸ روزه در آب در شرایط استاندارد (دمای $25 \pm 2^\circ$ سانتی‌گراد) نگهداری شدند. بعد از مراحل بالا مقاومت نمونه‌ها توسط دستگاه مشخص شدند (شکل ۷).



شکل ۶- نمونه‌های بتن خودتراکم در آزمایشگاه



شکل ۵- شیشه ریزدانه مورد استفاده



(ب)



(الف)

شکل ۷- نحوه انجام آزمایش‌های، الف: کششی، ب: خمشی

۳.۴. نتایج آزمایش‌ها

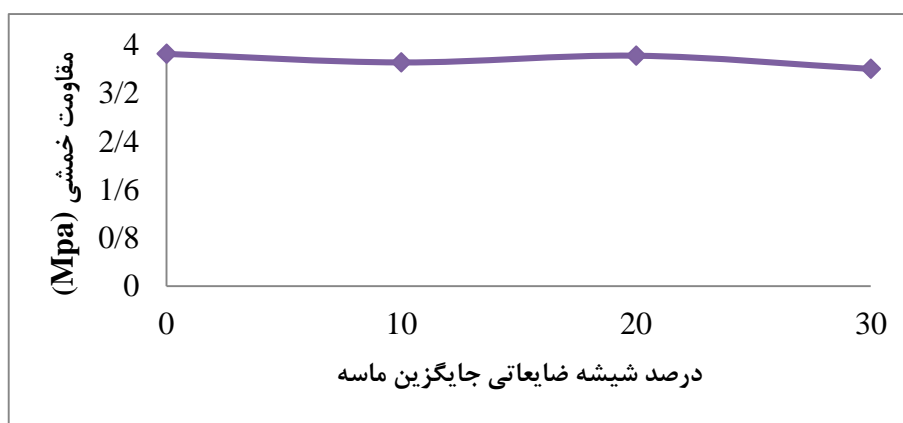
نمونه‌ها بعد از اینکه از قالب بیرون آورده شدند در حوضچه آب قرار داده می‌شوند بعد از گذشت مدت زمان معلوم (۲۸ روز) نمونه‌ها را از حوضچه بیرون آورده و در محیط آزمایشگاه قرار داده، تا خشک گردند. بعد از اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها، آن‌ها را وزن نموده، وزن نمونه‌ها در جدول ۹ و ۱۰ آورده شده است. در ضمن باید یادآور شد که مقاومت نمونه در این دو جدول قید شده است.

میانگین مقاومت‌های نمونه استوانه‌ای با ابعاد (۱۵×۳۰) سانتی‌متر و هم‌چنین نمونه تیر خمشی با ابعاد (۱۰×۱۰×۵۰) سانتی‌متر برای هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه را بدست آورده و مطابق شکل‌ها و جداول ارائه شده در ذیل برای درصد‌های مختلف شیشه ضایعاتی ریزشده جایگزین ماسه می‌باشد و همچنین جداول مربوط به نتایج آزمایش‌های قیف V، جعبه L، حلقه J و جریان اسلامپ در ذیل به آن اشاره شده است.

۳،۴،۱. مقاومت خمشی

جدول ۹- مقاومت نمونه‌های تیر خمشی برای سن ۲۸ روزه به همراه وزن مخصوص نمونه‌ها

نمونه	مقاومت (Mpa)					چگالی (kg/m ³)
	مقاومت میانگین	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	
SC1	100% sand+0% glass	4.19	3.53	3.84	3.85	2220
SC2	90% sand+10% glass	3.04	4.2	3.89	3.71	2276
SC3	80% sand+20% glass	4.06	3.75	3.66	3.82	2347
SC4	70% sand+30% glass	3.71	3.18	3.93	3.60	2416



شکل ۸- میانگین مقاومت نمونه‌های تیر خمشی (۱۰×۱۰×۵۰) سانتی‌متر برای سن ۲۸ روزه و درصدهای مختلف شیشه ضایعاتی



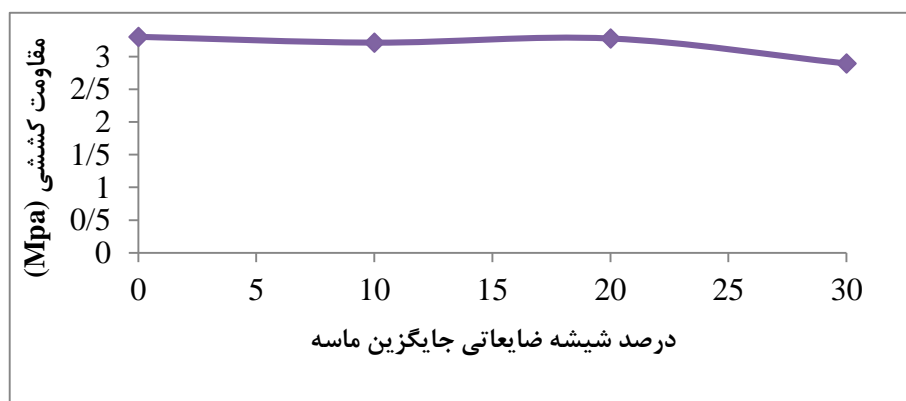
شکل ۹- میانگین وزن مخصوص نمونه‌های تیر خمشی (۱۰×۱۰×۵۰) سانتی‌متر برای سن ۲۸ روزه و درصدهای مختلف شیشه ضایعاتی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۹ و همچنین شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان اینگونه استنباط نمود که مقاومت خمشی با افزایش میزان شیشه در مقایسه با مخلوط شاهد (کنترلی) سیر کاهشی دارد. برای مخلوط دارای ۳۰٪ شیشه جایگزین شده، به میزان ۶٫۵٪ در مقایسه با مخلوط شاهد کاهش مقاومت خمشی را داریم. سیر کاهشی مقاومت خمشی مخلوط‌های SC3, SC2 و SC4 در مقایسه با SC1 چشمگیر نمی‌باشد. از شکل ۹ مشهود است که با افزایش درصد شیشه ضایعاتی در بتن خودتراکم، وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند و آن هم بدلیل تفاوت بین وزن مخصوص شیشه بازیافتی و ماسه می‌باشد.

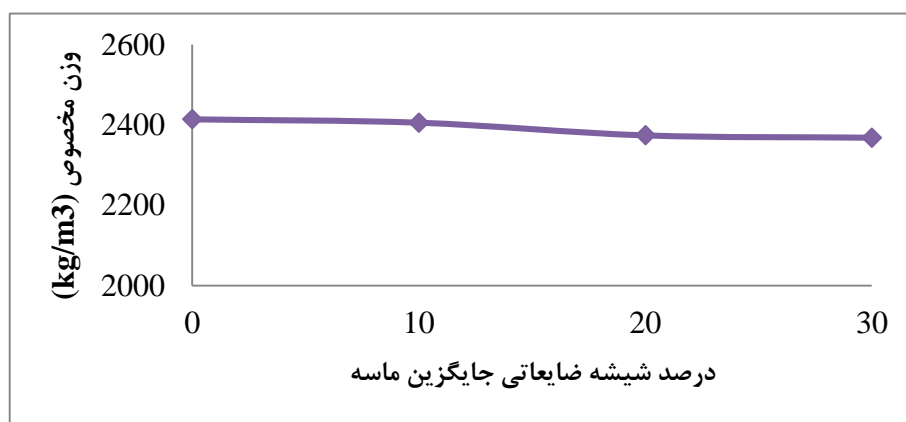
۳٫۴٫۲. مقاومت کششی

جدول ۱۰- مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای برای سن ۲۸ روزه به همراه وزن مخصوص نمونه‌ها

نمونه	مقاومت (Mpa)				وزن مخصوص (kg/m ³)	
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	مقاومت میانگین		
SC1	100% sand+0% glass	3.48	3.21	3.22	3.33	2414.02
SC2	90% sand+10% glass	3.14	3.30	3.21	3.22	2405.70
SC3	80% sand+20% glass	3.40	3.15	3.29	3.28	2374.20
SC4	70% sand+30% glass	2.89	2.84	2.96	2.90	2368.54



شکل ۱۰- میانگین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای برای سن ۲۸ روزه و درصد‌های مختلف شیشه ضایعاتی



شکل ۱۱- میانگین وزن مخصوص نمونه‌های استوانه‌ای برای سن ۲۸ روزه و درصد‌های مختلف شیشه ضایعاتی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ و همچنین شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان اینگونه استنباط نمود که مقاومت کششی با افزایش میزان شیشه در مقایسه با مخلوط شاهد (کنترلی) سیر کاهشی دارد. برای مخلوط ۳۰٪ شیشه جایگزین شده به میزان ۱۲،۳۴٪ در مقایسه با مخلوط شاهد کاهش مقاومت کششی را داریم. سیر کاهشی مقاومت کششی مخلوط‌های SC2, SC3 و SC4 در مقایسه با SC1 چشمگیر نمی‌باشد. از شکل ۱۱ مشهود است که با افزایش درصد شیشه ضایعاتی در بتن خودتراکم، وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند و آن هم بدلیل تفاوت بین وزن مخصوص شیشه بازیافتی و ماسه می‌باشد.

۳،۴،۳. نتایج آزمایش‌های بتن تازه

در جدول ۱۱ زمان اندازه‌گیری شده در آزمایش قیف V آمده است که نشان‌دهنده خاصیت عبور بتن از مکان‌هایی با انبوه میلگرد یا قالب‌های تنگ است و روانی بتن خودتراکم نیز نتیجه نهایی این آزمایش است.

جدول ۱۱: جزییات آزمایش قیف V

طرح اختلاط	زمان (ثانیه)
SC1	7.62
SC2	8.13
SC3	9.86
SC4	10.75

با توجه به زمان آزمایش قیف V با افزایش درصد های مختلف شیشه ضایعاتی ریزشده جایگزین ماسه این زمان افزایش پیدا می‌کند که این روند نشان‌دهنده کند شدن روانی بتن خودتراکم می‌شود.

جدول ۱۲ اطلاعات مربوط به آزمایش جریان اسلامپ را نشان می‌دهد. این آزمایش نیز روانی و کارایی بتن را نشان داده و در کنار آزمایش قیف V خاصیت حرکت بتن در سطح را بررسی می‌کند.

جدول ۱۲: آزمایش جریان اسلامپ و پارامترهای اندازه‌گیری شده در آن

طرح اختلاط	T_{50cm} (ثانیه)	$T_{\text{نهایی}}$ (ثانیه)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_{ave} (cm)
SC1	1.41	9.83	74	74	74
SC2	1.45	12.56	69	70.5	69.75
SC3	1.47	14.03	66	70.1	68.05
SC4	1.49	16.83	64	68	66

با توجه به زمان اندازه‌گیری شده برای رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتیمتری و زمان نهایی مربوط به آن به نتیجه مشابه آزمایش قیف V می‌رسیم و می‌توان گفت روانی بتن کندتر شده است. با توجه به قطرها نیز می‌توان گفت بتن تقریباً با پخش شدگی یکسانی همراه است.

جدول ۱۳ و ۱۴ به ترتیب اطلاعات مربوط به آزمایش‌های حلقه J و جعبه L را نشان می‌دهند. این دو آزمایش برای بررسی خاصیت عبور بتن از بین میلگردها طراحی شده‌اند و با توجه به نسبت ارتفاعی بتن در هر دو آزمایش می‌توان بحث کرد که آیا بتن به خوبی می‌تواند راه خود را از بین انبوه میلگردها باز کند یا خیر.

جدول ۱۳: آزمایش حلقه J، و اطلاعات مربوط به این آزمایش

طرح	h_{ave} (cm)	h_0 (cm)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_{ave} (cm)	$T_{\text{نهایی}}$ (sec)	h_{ave}/h_0
SC1	1.64	3.8	70.6	66	68.3	17.16	0.236
SC2	1.82	4.7	69.5	66.3	67.9	16.19	0.349
SC3	2.17	5.3	69.1	66.1	67.6	14.62	0.392
SC4	2.32	5.65	67.3	66.5	66.9	12.09	0.445

جدول ۱۴: آزمایش جعبه L و جزییات و اطلاعات مربوط به این آزمایش

طرح اختلاط	T _{20cm} (ثانیه)	T _{40cm} (ثانیه)	T _{نهایی} (sec)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h ₁ /h ₂
SC1	2.08	3.53	28.94	8.91	11	0.81
SC2	1.86	3.31	17.73	8.61	10.5	0.82
SC3	1.33	2.71	16.54	8	10	0.8
SC4	1.02	2.5	14.81	8.45	9.5	0.89

۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر عملی بودن استفاده از شیشه ضایعاتی در تولید بتن خودتراکم مد نظر می باشد. آزمایش های صورت گرفته حاکی از این است که جایگزینی شیشه ضایعاتی با ماسه نه تنها مناسب می باشد بلکه صرفه اقتصادی نیز دارد و کمک شایانی به حفظ محیط زیست نموده و نیز به حفظ هر چه بیشتر مصالح ساختمانی برای آیندگان منجر می شود.

بر پایه نتایج آزمایشگاهی، می توان این گونه بیان کرد که:

۱- مقاومت خمشی و کششی نمونه های حاوی شیشه ضایعاتی به عنوان ریزدانه کاهش پیدا کرده است، اما این کاهش قابل چشم پوشی است

۲- بر پایه نتایج بدست آمده می توان شیشه ضایعاتی را به عنوان ماسه در ساختار بتن خودتراکم به کار برد، بدون کاهش قابل توجهی در مقاومت بتن سخت شده.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از زحمات و تلاش های دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان در تهیه تحقیق حاضر تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- [1]. Ozawa, K., Kunishima, M., Maekawa, K. and Okamura, H., "Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures", Proceedings of the second East-Asia and Pacific (1989).
- [2]. Reindel, J., "Report by Recycling Manage", Dane county, Department of Public Works, Madison, USA, August (1998).
- [3]. Shayan, A. and Xu, A., "Value-added Utilization of waste glass in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 81-89, (2004).
- [4]. Meyer, C. and Baxter, S., "Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks", New York State Energy and Research Development Authority, NYSERDA, Report 97-15, November Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, pp. 445-450, January (1997).
- [5]. ASTM C618-78 "specification for fly ash and row or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete
- [۶]. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران " استاندارد شماره ۳۴۳۲ ویژگی های پوزولان های طبیعی " تهران.
- [7]. Topcu, I.B. and Canbaz, M., "Properties of concrete containing waste glass", Cement an Concrete Research, Vol. 34, pp. 267-274, (2004).