



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

## تأثیرات واکنش های قلیایی - سیلیسی خرده شیشه در بتن

علی مهرجو

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

### چکیده

در چند سال اخیر بتن با مقاومت بالا در بسیاری از سازه ها کاربرد پیدا کرده است.

برای دستیابی به بتن دارای مقاومت بالا ، مواد مختلفی به آن اضافه شده اند که دارای خواص با دوام بیشتری هستند . از طرفی تولید سیمان به عنوان اصلی ترین ماده ساخت بتن ، باعث تولید گاز دی اکسید کربن و اثرات زیان بار آن به لایه اوزون میشود ، لذا محققین را به یافتن راه حلی جهت کاهش در سهم مصالح طبیعی و تولید گازهای گلخانه ای در تولید بتن واداشته است . حجم زیاد شیشه های ضایعاتی بازیافت ناپذیر، به عنوان جایگزین مصالح مذکور در بتن ، اخیرا مورد توجه قرار گرفته است .

در این تحقیق پس از ساخت طرح اختلاط مرجع ، متوجه شدیم که مقاومت فشاری ، ضریب ارتجاعی ، مقاومت کششی ، اسلامپ ، وزن مخصوص بتن های تازه وسخت شده طرح اختلاط حاوی خرده شیشه و پودر شیشه به صورت همزمان ، نسبت به طرح های اختلاط حاوی فقط پودر شیشه ، کاهش را دارد ، که این امر، عملکرد نامطلوب شیشه به صورت ذرات درشت تر(خرده شیشه ) در ساختار بتن و افزایش فعالیت قلیایی-سیلیسی را نشان میدهد . البته قابل ذکر است که عملکرد نامطلوب خرده شیشه در خواص مکانیکی بتن از طریق جایگزینی سیمان با پودر شیشه ، تا حدود بسیار زیادی بهبود یافت.

**کلمات کلیدی:** مقاومت فشاری ، خرده شیشه ، ضریب ارتجاعی ، پودر شیشه

### ۱- مقدمه

یک چالش بسیار مهم در صنعت عمران (ساخت و ساز) ، بدست آوردن خواص مادی برتر بتن برای استفاده در ساخت و ساز بر اساس کاربرد مربوطه است [1]. بتن یکی از مصالح پر مصرف در سازه های مهندسی است . نقطه قوت بتن در تحمل فشارهای بالا باعث استفاده فراوان از آن گردیده است . به این ترتیب که در برابر شکست های ناگهانی و تاب و تحمل تنشهای فشاری ، مقاومت خوبی از خودش نشان میدهد . جذب انرژی بالا و مقاوم بودن آن در برابر آتش سوزی از دیگر مزایای بتن میباشد.



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2

2ND NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

بتن با استحکام بالا، شامل استفاده از الیاف در زمینه های مختلف است که مزایای مختلفی مانند کنترل انتشار ترک ها و افزایش ظرفیت خمش اعضا سازه را به همراه دارد. در کنار داشتن این ویژگی ها، مقاومت کششی بتن بسیار پایین است، به همین علت تقویت بتن و بهبود خواص آن از مهمترین مواردی هستند که امروزه مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است.

به همین دلیل مهمترین هدف محققین دست یابی به طرحی جدید از بتن با ویژگی های برتر است، ازین رو بسیاری از انواع الیاف مانند الیاف شیشه، الیاف بازالت، الیاف کولار، الیاف کربن، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن در بتن توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته اند.

در سال های اخیر استفاده از ضایعات شیشه در بتن اقبال زیادی یافته که لزوم بررسی اثرات این ضایعات را بر خواص رفتاری و مکانیکی بتن ضروری میسازد. شیشه یکی از قدیمی ترین مصالح بشرساز است که در اشکال مختلف تولید میشود ازین رو نیاز به بازیافت به منظور جلوگیری از مشکلات زیست محیطی دارد. از لحاظ تئوری شیشه یک ماده ۱۰۰٪ بازیافتی است که میتواند به صورت نامحدود و بدون هیچ گونه افت کیفیتی بازیافت شود.

نگرانی بزرگی که در استفاده از شیشه در بتن وجود دارد، واکنش شیمیایی ما بین ذرات سیلیسی اشباع شیشه و قلیایی های مخلوط بتن است، که واکنش قلیایی - سیلیسی معروف است. این واکنش میتواند برای پایداری بتن بسیار خطرناک باشد به این منظور باید پیش گیری مناسب در جهت کمتر کردن اثر این واکنش انجام شود.

این پیشگیری میتواند با استفاده از یک ماده پوزولانی مناسب مانند خاکستر بادی، متاکائولین یا میکروسیلیسی با نسبت مناسب در مخلوط بتن انجام گیرد [3]. از تحقیق های صورت گرفته توسط محققین چنین نتیجه گیری میشود که شیشه میتواند به ۳ صورت درشت دانه، ریزدانه و پودر شیشه در بتن استفاده شود.

درشت دانه و ریز دانه میتوانند باعث واکنش قلیایی-سیلیسی در بتن شوند اما پودر شیشه میتواند اثر واکنش قلیایی-سیلیسی را کاهش دهد. البته در بعد تجاری بسیار به صرفه است که پودر شیشه به جای سیمان مصرف شود تا اینکه شیشه به عنوان سنگدانه در بتن مصرف شود.

قابل ذکر است که پودر شیشه یک ماده با ارزش است که از شیشه هایی که برای بازیافت مناسب نیستند به دست می آید.

در تحقیقات شخاوت و آگاروال نشان دادند که ضایعات شیشه میتواند به طور مؤثر در بتن به عنوان یک پوزولان شیشه ای استفاده شود. بنابراین پودر شیشه تا حدی توانست با سیمان جایگزین و باعث بهبود مقاومت و دوام بتن گردد. [2]

تحقیق های ناصر و سروشیان نشان داد هنگامی که اندازه ذره شیشه خرد شده به مقیاس میکرو میل کند، واکنش پوزولانی با هیدرات سیمان انجام میگردد که باعث تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته ثانویه میگردد و در نهایت نتیجه گرفته شد که پودر شیشه جایگزین بخشی از سیمان، دستاورد های قابل توجهی در مقاومت بتن های بازیافتی ایجاد کرده و واکنش های قلیایی-سیلیسی را محدود می نماید.



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دوین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

عامری و همکاران خرده های شیشه را با نسبت های ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ جایگزین قسمتی از دانه های لیکا نمودند ، نتایج حاصله نشان داد بیشترین افزایش مقاومت مربوط به ۵٪ خرده شیشه بوده است . همچنین اسرا واچ ال تراساوی شیشه بازیافتی را با نسبت های ( ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ ، ۴۰٪، ۵۰٪ ) بادانه بندی ریز در بتن خود متراکم جایگزین ساختند . نتایج مشخص نمود که اسلامپ با افزایش مقادیر شیشه بازیافتی رشد داشت . از طرف دیگر، مقاومت های فشاری ، کشش و خمشی و همچنین ضریب ارتجاعی استاتیکی در مخلوط های بتن خود تراکم ، با افزایش میزان شیشه بازیافتی ، کاهش داشت .

## ۲- شرح آزمایشات

### ۲-۱- مشخصات فیزیکی مصالح مصرفی

#### • سیمان

سیمان مصرفی در ایران معمولاً سیمان پرتلند ، نوع ۲ می باشد که مهم ترین ویژگی آن مقاومت در برابر حمله سولفات ها و نمک ها است . سیمان مورد استفاده در این تحقیق با توده ویژه وزن مخصوص  $3,15 \text{ g/cm}^3$  و سطح ویژه  $2922 \text{ cm}^2/\text{g}$  تهپیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شده است و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران و ASTM C-150 را دارد .

#### • سنگدانه ها

دانه بندی سنگدانه ها عامل تعیین کننده ای در مقدار کارایی مخلوط بتن است . کارایی به نوبه خود بر مقدار آب و سیمان لازم در مخلوط اثر میگذارد ؛ جداسدگی و آب انداختن بتن را کنترل میکند .

بنابراین دانه بندی سنگدانه در تعیین نسبت مواد تشکیل دهنده مخلوط بتن اهمیت بسیار زیادی دارد . در این تحقیق شن مصرفی از نوع شکسته بوده و حداکثر اندازه اسمی شن مصرفی ۱۹،۵ و ۱۲،۵ میلی متر بوده است . آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق استاندارد ASTM C-127 برای مصالح سنگی درشت دانه انجام پذیرفت .

#### • خرده شیشه ضایعاتی

در این تحقیق مخلوط نهایی ماسه شیشه ای بر اساس محدوده استاندارد دانه بندی ASTM C-33 تولید شده که سختی دانه بندی آن به همراه دانه بندی شن ۱۹،۵ mm مصرفی در تحقیق در نمودار زیر آمده است:

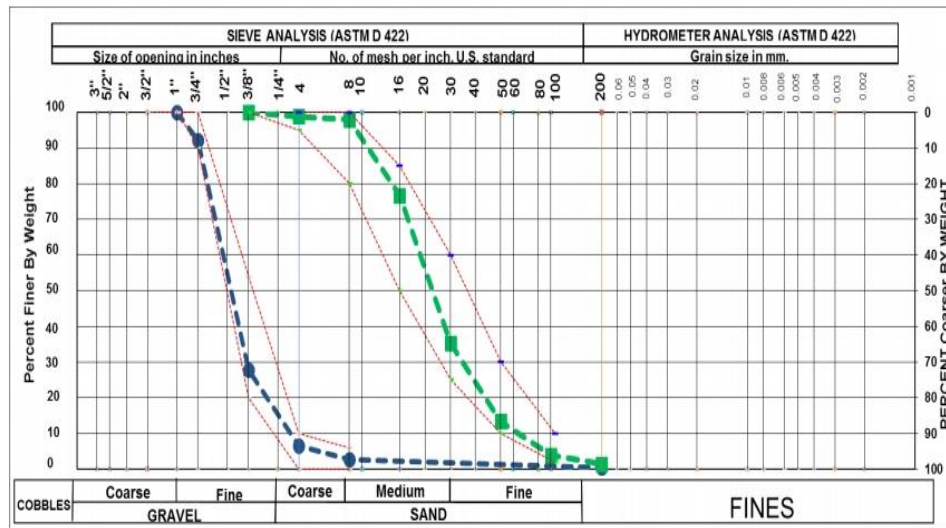
#### • منحنی دانه بندی شن و خرده شیشه



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING



• ابعاد خرده شیشه استفاده شده در تحقیق

ردیف	مشخصات ابعادی محصول (میکرون)
۱	کوچک تر از ۸۰
۲	۸۰-۱۵۰
۳	۱۵۰-۲۱۲
۴	۲۱۲-۳۰۰
۵	۳۰۰-۶۰۰
۶	۶۰۰-۱۲۰۰
۷	۱۲۰۰-۲۳۰۰
۸	۲۳۰۰-۳۳۰۰
۹	۳۰۰۰-۴۰۰۰
۱۰	۴۰۰۰-۵۰۰۰

• پودر شیشه ضایعاتی

شیشه یک قلیایی ناپایدار است که در محیط بتن میتواند باعث مشکلات ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی شود. مطالعات اخیر نشان میدهد که اگر شیشه زائد به اندازه کافی ریز گردد و تبدیل به پودر بسیار ریز شود میتواند در مخلوط های سیمانی به دور از هرگونه نگرانی در مورد وقوع واکنش قلیایی-سیلیسی مورد استفاده قرار گیرد. پودر شیشه در تحقیق دارای وزن



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

مخصوص  $2,96 \text{ g/cm}^3$  و  $2612 \text{ cm}^2/\text{g}$  ویژه می باشد. ترکیبات شیمیایی این پودر شیشه که حاصل آزمایش طیف نگاری فلورسنانی اشعه ایکس می باشد در جدول ۳ ارائه گردیده است.

## • مشخصات پودر شیشه مصرفی

عنصر	ppm	اکسید	%
Cl	۴۹۶	SiO <sub>2</sub>	۷۲/۰
S	۳۸۳	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۵۸
As	۹	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۷۶
Ba	۷۷	CaO	۷/۹۶
Cr	۶۶	Na <sub>2</sub> O	۱۱/۳۶
Cu	۱۷۶	MgO	۳/۲۷
Ni	۳۱	K <sub>2</sub> O	۰/۱۹
Pb	۱۵۸	TiO <sub>2</sub>	۰/۰۶
Rb	۱۹	MnO	۰/۰۲
Sr	۸۷	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۱
V	۱۹	LOI	۲/۹۷
Y	۱۱		
Zr	۱۳۸		
Zn	۲۲		
Mo	۳۳		

## • فوق روان کننده

فوق روان کننده، نسبت اب به سیمان را کاهش میدهد که منجر به کاهش نفوذپذیری خواهد شد و در نتیجه واکنشهای قلیایی - سیلیسی کاهش می یابد. فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق جهت تسریع در روند کسب مقاومت های اولیه و نهایی بتن، به واسطه کاهش قابل توجه میزان اب مصرفی در مخلوط بتن و نیز افزایش قابل توجه کارایی با خاصیت حفظ اسلامپ بتن، در محدوده زمانی معین بدون نیاز به اب موجود و همچنین جهت افزایش دوام بتن مورد استفاده قرار گرفت.

تولید این روان کننده بر اساس این نامه ASTM c-494 در رده G قرار میگیرد.

## • اب

اب مورد استفاده در ساخت طرح اختلاط این تحقیق اب اشامیدنی است.



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

## • نمونه ها و طرح اختلاط

از تحقیق هایی که قبلا انجام داده شده دریافتیم که با جایگزینی ماسه با خرده شیشه در نسبت های زیاد ، خواص مکانیکی بتن کاهش چشمگیری پیدا میکند . در این تحقیق بعد از ساخت طرح مرجع ، ماسه و خرده شیشه را با نسبت های ۵٪، ۸٪، ۱۲٪ جایگزین کردیم و سه طرح اختلاط تهیه شد .

موضوعی که متوجه ان شدیم این بود که در نسبت های پایین خواص مکانیکی بتن هم پایین تر می آید . در نتیجه همان نسبت ۸٪ خرده شیشه به ماسه ، به عنوان نسبت بهینه تأیید شد . همچنین برای جایگزین کردن پودر شیشه با سیمان متوجه شدیم که در نسبت های پایین کارایی و خواص مکانیکی بتن کاهش میابد و چون با نسبت ۸٪ ، خرده شیشه با ماسه ، بتن خواص بهتری از خود نشان می دهد در نتیجه مینا را روی ۸٪ نسبت اختلاط خرده شیشه گرفتیم و پودر شیشه را با نسبت های ۴٪، ۸٪، ۱۲٪ جایگزین سیمان کردیم .

روش نامگذاری طرح های اختلاط در این تحقیق به این شکل است که GP و GS به همراه عدد پسوند شان به ترتیب نشان دهند درصد اختلاط پودر شیشه جایگزین سیمان و درصد اختلاط خرده شیشه جایگزین ماسه است.

## • جزییات طرح های اختلاط تحقیق

کد طرح	درصد پودر- شیشه	درصد خرده- شیشه	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۳/۴" (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۲/۸" (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	پودر شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	خرده شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت آب به سیمان
SH	۰	۰	۴۲۲/۲	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۰	۰	۰/۴۴
GS5	۰	۵	۴۲۲/۲	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۰	۴۳/۶	۰/۴۴
GS8	۰	۸	۴۲۲/۲	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۰	۶۹/۸	۰/۴۴
GS12	۰	۱۲	۴۲۲/۲	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۰	۱۰۴/۷	۰/۴۴
GP4	۴	۰	۴۰۵/۳	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۱۶/۹	۰	۰/۴۴
GP8	۸	۰	۳۸۸/۴	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۳۳/۸	۰	۰/۴۴
GP12	۱۲	۰	۳۷۱/۶	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۷۲/۹	۵۰/۷	۰	۰/۴۴
GS8GP4	۴	۸	۴۰۵/۳	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۳۸/۰	۱۶/۹	۶۹/۸	۰/۴۴
GS8GP8	۸	۸	۳۸۸/۴	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۸۰۳/۱	۳۳/۸	۶۹/۸	۰/۴۴
GS8GP12	۱۲	۸	۳۷۱/۶	۵/۶	۱۸۵	۴۳۸/۱	۴۳۸/۶	۷۶۸/۲	۵۵/۷	۶۹/۸	۰/۴۴



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

## • نحوه ساختن نمونه ها

اول ماسه با سیمان و پودر شیشه در مخلوط کن ریخته شدند و به مدت ۲,۵ دقیقه مخلوط شدند. بعد نصف اب و فوق روان کننده را اضافه کردیم و ۲ دقیقه دیگر اختلاط را ادامه دادیم. در مرحله بعد مصالح درشت دانه و خرده شیشه به درون مخلوط کن ریخته شد و اب باقی مانده کم کم ریخته شد و به مدت ۷ دقیقه دیگر اختلاط ادامه پیدا کرد. در ادامه، بتن در سه مرحله در قالب ها ریخته شد و هر لایه به تعداد ۲۵ ضربه کوبیده شد.

بعد از اتمام ریختن بتن در قالب، نمونه ها در یک پوشش مرطوب، در شرایط ۹۰٪ رطوبت به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و سپس نمونه ها به حوضچه با دمای ۳۲ درجه سانتی گراد منتقل شدند.

## ۳- آزمایش ها

### • آزمایش اسلامپ

آزمایش اسلامپ کارایی بتن را نمیسنجد ولی میتوان انرا به صورت سنجشی از روانی بتن توصیف کرد. ما از یک قالب مخروطی ناقص که قطر بالای آن ۱۰ cm و قطر پایین آن ۲۰ cm و ارتفاعش ۳۰ cm است استفاده کردیم. بتن در سه لایه که هر کدام از طریق ۲۵ ضربه با میله مخصوص به صورت ماریچ متراکم میشوند در قالب ریخته میشود.

### • آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

برای تعیین وزن مخصوص بتن تازه بر اساس استاندارد ۳-۳۲۰۳-۶ موسسه استاندارد و منطبق بر استاندارد ASTM c-138، شروع به نمونه گیری از بتن ها بر اساس استاندارد ASTM c-172 کردیم.

### • آزمایش مقاومت فشاری

نمونه های بتن بعد از ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۱ روز از حوضچه اب خارج شدند و با جک هیدرولیکی بتن شکن بر اساس استاندارد BS\_188 نیروی وارده با سرعت ۱۳۵۰ کیلوگرم بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفتند.

### • آزمایش مقاومت کششی

نمونه های استوانه ای بعد از ۲۸ روز از حوضچه اب خارج شدند و آزمایش مقاومت کشش به روش دینیم شدن با سرعت ۰,۹۴ کیلو نیوتون بر ثانیه روی آنها انجام گرفت.

## ۴- نتایج آزمایشات

### • اسلامپ





تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

با انجام آزمایشات متوجه شدیم که با یک تناسب تقریباً خطی با افزایش مقدار خرده شیشه به جای ماسه، اسلامپ بین ۶الی ۱۰ درصد کاهش میابد که میتوان شکستگی بیشتر خرده شیشه و میزان جذب آب بیشتر فیلر خرده شیشه را جزء دلایل آن دانست و از طرفی به صورت کلی اضافه کردن پودر شیشه در تمام طرح های اختلاط باعث کاهش اسلامپ نسبت به طرح مرجع میگردد. موضوع بدیهی که قابل پیشبینی هم بود کاهش شدید اسلامپ نمونه ها در طرح های دارای خرده شیشه و پودر شیشه به صورت همزمان بود. این افت اسلامپ چیزی در حدود ۲۴ تا ۳۲ درصد میباشد.

## • مقاومت فشاری

درمورد مقاومت فشاری، اینگونه برداشت کردیم که با افزایش مقدار خرده شیشه به جای ماسه، مقاومت فشاری کاهش میابد و این میزان کاهش با افزایش سن نمونه ها کمتر میشود. از طرفی استفاده از پودر شیشه به جای سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری شد که البته باید میزان استفاده از پودر شیشه فقط تا ۸٪ باشد چون از ۸٪ به بالا نه تنها افزایش مقاومتی نداریم بلکه کاهش جزئی هم احساس میشود. بیشترین میزان رشد مقاومت در سنین ۷ تا ۲۸ روز اتفاق می افتد. استفاده همزمان از خرده شیشه و پودر شیشه در طرح باعث رشد مقاومت فشاری نمونه ها شد اما نکته قابل ذکر اینکه این افزایش مقاومت مقدار قابل توجهی نبود (چیزی در حدود ۰.۵ الی ۳.۵ درصد) در مجموع نتایج حاصل ازمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز را در نموداری به شکل نمودار زیر آورده ایم تا راحت قابل درک باشد (نمودار صفحه ۱۵، شکل ۱۳)

## • تغییرات مقاومت فشاری



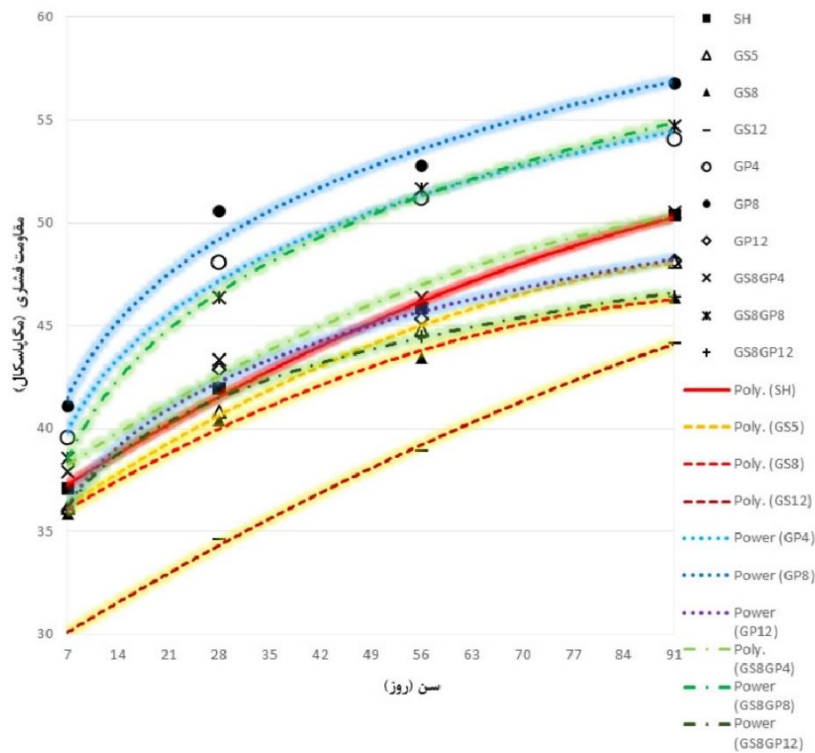


تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2

ND NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

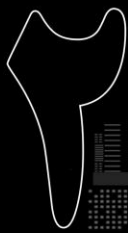


### • مقاومت کششی

درمورد مقاومت کششی باید بگوییم که با افزایش مقدار خرده شیشه به جای ماسه مقدار مقاومت کشش بتن دچار کاهش شد، لازم به ذکر است که در نسبت های جایگزینی بیشتر از ۸٪ روند کاهش مقاومت به صورت تصاعدی بیشتر میشود. دلیل این موضوع را میتوانیم به ضعیف بودن دانه های خرده شیشه نسبت بدهیم، که میزان بیش از اندازه خرده شیشه ها باعث ضعف بیشتر ساختار بتن میشود.

درمورد افزودن پودر شیشه به بتن به جای سیمان تا نسبت ۸٪ میتوان گفت مقدار مقاومت کششی بتن افزایش میابد، که دلیلش را هم میتوان تأثیر واکنش پوزولانی - سیلیسی موجود در پودر شیشه عنوان کرد.

در طرح های ترکیبی که پودر شیشه به عنوان سیمان و خرده شیشه به جای ماسه استفاده شدند، مقاومت کششی افزایش پیدا کرد به طوری که افزایش مقاومتی تا حدود ۲٪ الی ۱۱٪ نسبت به طرح مرجع مشاهده شد. در این طرح میزان خرده شیشه، اگر میخواهیم نتیجه مطلوب بگیریم، نباید بیشتر از ۸٪ نسبت به ماسه باشد و در صورت کلی میتوان اظهار کرد که اضافه کردن پودر شیشه به جای سیمان در طرح اختلاط حاوی خرده شیشه، تماماً عملکرد ضعیف خرده شیشه در خصوص مقاومت کشش را تحت تأثیر مطلوب خود قرار داده و ضعف انرا از بین خواهد برد.



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

#### • نسبت مقاومت کششی به فشاری

خیلی از محققین برای تعیین دقیق تر مقاومت کششی، معمولاً آنرا به صورت نسبتی از مقاومت فشاری بیان میکنند. در طرح هایی که خرده شیشه جایگزین ماسه شده است، نسبت مقاومت کششی به فشاری بسیار به هم نزدیکتر بوده و حدوداً ۰/۲۵٪ میباشد. که هرچقدر میزان خرده شیشه کمتر باشد این نسبت بیشتر میشود، بعضاً تا ۰/۱٪.

زمانی که پودر شیشه را جایگزین سیمان میکنیم (با نسبت مشخص) نسبت مقاومت کششی به فشاری افزایش میابد که این موضوع نشان دهنده عملکرد بهتر پودر شیشه در کشش نسبت به فشار است. بدیهی است که در طرح های مختلط حاوی پودر شیشه و خرده شیشه به صورت همزمان هرچقدر میزان پودر شیشه افزایش پیدا کند، نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری نمونه ها افزایش پیدا میکند.

#### • ضریب ارتجاعی بتن

ضریب ارتجاعی بتن پارامتر بسیار مهمی در طراحی سازه ها می باشد که معمولاً اولین فاکتوری است که مورد بررسی قرار میگیرد. تغییر شکل بتن تا حدودی وابسته تغییر شکل ارتجاعی سنگدانه هایش است. میتوان گفت نوع سنگدانه ها روی ضریب ارتجاعی بتن تأثیر میگذارد. [4]

به صورت کلی با افزایش نسبت خرده شیشه به جای ماسه ضریب ارتجاعی بتن کاهش میابد. این میزان کاهش در سنین ۹۱ روزه کمتر میشود اما اگر نسبت خرده شیشه از ۰/۵٪ بیشتر شود میزان کاهش ضریب ارتجاعی بیشتر خواهد شد.

از طرفی با افزایش مقدار پودر شیشه به جای سیمان البته تا ۰/۸٪، میزان ضریب ارتجاعی افزایش پیدا میکند. زمانی که از خرده شیشه و پودر شیشه را به طور همزمان استفاده کنیم به شرطی که میزان درصد خرده شیشه به جای ماسه ۰/۸٪ باشد، ضریب ارتجاعی بتن افزایش میابد. به عنوان یک نکته جالب میتوان گفت جایگزینی پودر شیشه با سیمان در طرح های ترکیبی (خرده شیشه و پودر شیشه)، پودر شیشه ضعف های ناشی از خرده شیشه را کاهش داده و میتوان علاوه بر طراحی مقاطع بتن به روش تنش مجاز، به روش تنش نهایی سازه را طراحی کرد.

#### ۵- نتایج کلی

اگر بخواهیم کلیت تحقیق و اثرات مواد شیشه ای (خرده شیشه و پودر شیشه) بر بتن را به صورت کاملاً مختصر و مفید نشان دهیم، میتوانیم این چنین بگوییم که:

#### • در مورد جایگزینی خرده شیشه با ماسه

- ۱- با افزایش مقدار خرده شیشه، مقاومت فشاری طرح اختلاط نسبت به طرح مرجع کم میشود.
- ۲- در صورت افزایش مقدار خرده شیشه، اسلامپ بتن کاهش میابد.



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup>

NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

۳- وزن مخصوص بتن حاوی خرده شیشه ، در صورت افزایش آن تغییر خاصی نمیکند ، اما اگر ریز بیانه به آن نگا کنیم کاهش ناچیزی دارد .

۴- مقدار کاهش مقاومت فشاری در این نوع طرح اختلاط ، تا زمانی که نسبت خرده شیشه به ماسه از ۰ الی ۸٪ باشد ، کم می باشد ، اما بالای ۸٪ خرده شیشه این میزان کاهش ، افزایش میشود .

۵- با زیاد شدن مقدار خرده شیشه جایگزین ، مقاومت کششی تمامی طرح های اختلاط ( در نسبت های متفاوت) کاهش میابد .

۶- با بیشتر شدن خرده شیشه ، ضریب ارتجاعی استاتیکی تمامی طرح های اختلاط نسبت به طرح مرجع کاهش میابد.

## • در مورد جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان

۱- میزان اسلامپ طرحی که پودر شیشه دارد نسبت به طرح های بدون پودر شیشه کاهش میابد ، اما با افزایش مقدار پودر شیشه سرعت کاهش اسلامپ کم میشود .

۲- وزن مخصوص بتن حاوی پودر شیشه ، تغییر خاصی نمیکند ، اما در کل ۰ تا ۸٪ پودر شیشه ، میزان وزن مخصوص بتن افزایشی است و در نسبت های بالای ۸٪ ، وزن مخصوص کاهش میابد ، هرچند که این تغییرات بسیار ناچیز هستند .

۳- در مورد مقاومت فشاری ، تا نسبت ۸٪ جایگزینی پودر شیشه مقدار مقاومت فشاری افزایش میابد و در نسبت های بالاتر از ۸٪ میزان مقاومت فشاری کاهش میابد .

۴- مقاومت کششی هم مانند مقاومت فشاری عمل کرده و تا نسبت ۸٪ جایگزینی رشد و در درصدهای بالاتر از ۸٪ کاهش داشته است .

۵- با افزایش میزان پودر شیشه ، ضریب ارتجاعی بتن افزایش میابد و در جایگزینی های بالاتر از ۸٪ نتیجه عکس خواهد داد ، اما قابل ذکر است که روند رشد ضریب ارتجاعی بتن در طول زمان با افزایش نسبت جایگزینی ، آهسته تر میشود .

## • در مورد جایگزینی خرده شیشه و پودر شیشه به صورت همزمان

۱- اسلامپ این نوع نمونه ها کاهش قابل ملاحظه ای داشت ، اما با افزایش مقدار جایگزینی درصد این کاهش به مرور کمتر میشود .

۲- وزن مخصوص این طرح ها تا ۸٪ جایگزینی نسبت به طرحی که فقط خرده شیشه دارد رشد داشته و همین طور نسبت به طرح مرجع .

۳- استفاده همزمان خرده شیشه و پودر شیشه در میزان مقاومت فشاری نسبت به طرح مرجع تغییرات چشمگیری نداشت ، اما نسبت به طرح با جایگزینی فقط خرده شیشه ، رشد قابل ملاحظه ای دارد . ( البته تا ۸٪ پودر شیشه )

۴- به صورت کلی افزایش جایگزینی ها در این نوع طرح ( تا ۸٪ ) باعث افزایش مقاومت کششی میشود .

۵- ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن در این نمونه ها با افزایش درصد جایگزینی نسبت به طرح حاوی فقط خرده شیشه ( تا ۸٪ ) در تمام بتن ها رشد دارد ، اما نسبت به طرح مرجع کاهشی است . گفتنی است روند رشد ضریب ارتجاعی



تاریخ برگزاری  
۱۴۰۱/۱۰/۳۰

# دومین همایش ملی مهندسی عمران و معماری

2<sup>ND</sup> NATIONAL CONFERENCE OF CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

استاتیکی با مرور زمان ، در تمامی طرح های اختلاط ترکیبی ( خرده شیشه و پودر شیشه همزمان ) تقریباً به یک نسبت بوده است .

۶- پودر شیشه ، عملکرد ضعیف خرده شیشه در خواص مکانیکی بتن را تا حدود بسیار زیادی جبران میکند .

## منابع و مراجع

- [1] E . EMAM ALI S . AL-TERSAWY , " recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete . "
- [2] S.B , shekhawat , V.C , Aggarwal " utilization of waste glass powder in concrete "
- [3] S.C , kou , C.S , poon , " properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate "
- [4] ASTM C494/C494M-99 a . standard specification for chemical admixtures for concrete