

بررسی اثر الیاف FRP بر مقاومت‌سازی قاب‌های بتن مسلح با سیستم دال تخت دارای باز شو تحت بار گذاری چرخه‌ای



سیدعلی موسوی داودی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی

مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی طبری

عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

دالهای تخت بتن مسلح یکی از سیستم‌های مرسوم سازه‌ای است. این دالها برای پوشش کف در ساختمانهای با بارهای سبک، نظیر آپارتمان‌های مسکونی، و با دهانه‌های ۴/۵ تا ۶ متر مناسب و اقتصادی است. عدم وجود تیر در این قاب‌ها، موجب سهولت اجرا، افزایش سرعت ساخت و سازه، افزایش ارتفاع خالص طبقه و کاهش ارتفاع کلی ساختمان می‌گردد. با این وجود، خطر شکست ترد سوراخ‌کننده در اتصالات دال ستون باعث می‌شود که این سیستم‌ها مستعد خرابی پیش‌رونده‌ای باشند که با بروز گسیختگی در یک اتصال همراه خواهد بود از این رو در سال‌های اخیر تقویت سازه‌های بتن مسلح دارای دال تخت مورد توجه زیادی قرار گرفته است، در این میان مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری روشی برای تقویت سازه‌های بتنی محسوب می‌شود که بسیار پر کاربرد است، علاوه بر این روش‌های مقاوم‌سازی دیگری از جمله غلاف بتنی و فولادی نیز وجود دارد که کاربرد فراوانی دارد، اما روش مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری به دلیل کاهش زمان اجرا، سبک بودن و مقاومت بسیار بالای آنها در کشش به نحوه موثری در تقویت سقف‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای نظیر انفجار بیشتر مورد کاربرد قرار گرفته است، با توجه اهمیت موضوع در این تحقیق برای مقایسه عملکردی روش مقاوم‌سازی غلاف بتنی و فولادی، با روش مقاوم‌سازی با الیاف پلیمری از یک سازه ۵ طبقه بتنی با سیستم قاب خمشی که دارای سیستم سقف دال تخت است توسط برنامه Etabs تحلیل و طراحی می‌شود سپس برای بررسی تحلیل عددی و قیاس روش‌های مقاوم‌سازی سازه ۵ طبقه طراحی شده در برنامه Abaqus مدل‌سازی می‌شود، بعد از انجام تحلیل اجزای محدود، در انتها مشاهده می‌شود که به دلیل مزایای فراوان الیاف FRP این روش تقویتی نسبت به روش غلاف بتنی و فولادی عملکرد بهتر و مناسب‌تری خواهد داشت.

کلمات کلیدی: بارگذاری چرخه‌ای، قاب بتن مسلح، بهسازی، دال تخت، تحلیل اجزاء محدود

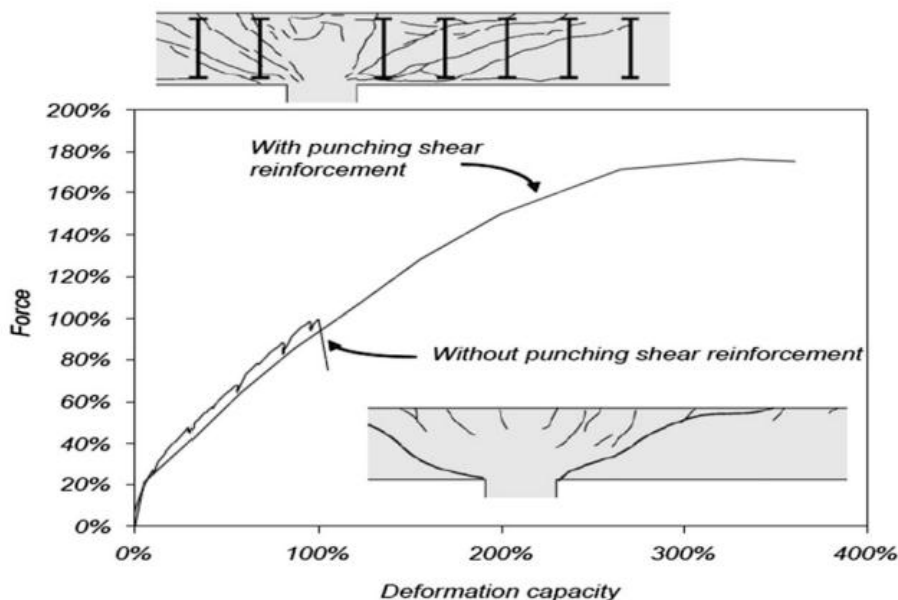
۱. مقدمه

دال‌های تخت صرفاً برای تحمل بارهای قائم طراحی می‌شوند و سیستم‌های باربر جانبی وظیفه تحمل نیروهای جانبی ناشی از زلزله را دارند، با این وجود برش‌های

چشمگیری در محل اتصال دال به ستون به وجود می‌آید. در زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی، ۹۱ سازه دال تخت ویران شدند و ۴۴ سازه نیز به علت گسیختگی پانچ خسارات شدیدی دیدند [۱]. ساختمان‌های بتن مسلح با ارتفاع کم و

یکی از بهترین راه های مقاوم سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله که اطراف آنها فضای خالی وجود دارد، استفاده از عناصر مقاوم در خارج ساختمان است که این سیستم مقاوم سازی دارای کمترین تخریب و مزاحمت برای وضع موجود و امکان استفاده بدون تخلیه را در بردارد [۲].

زیاد و سیستم دال تخت بدون و با دیوار برشی، به تعداد زیاد در ایران وجود دارند که بنا به دلایلی که قبلاً بیان شد نیاز به بررسی آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی دارند. طی بررسی و مطالعات موردی به عمل آمده در گذشته و با توجه به وضع موجود و سازه ساختمان، مشاهده شد که



شکل (۱) - نمایی از تقویت دال تخت و اعضای سازه‌ای [۲]

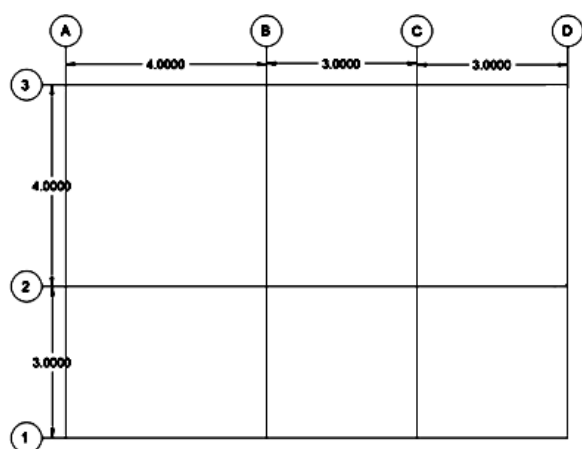
آن به وقوع می‌پیوندد و آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران اکثر شهرهای پر جمعیت کشور را با خطر نسبی زیاد و بسیار زیاد معرفی کرده است [۵]. یکی از موثر ترین راه‌های کاهش خسارات ناشی از زمین لرزه ها مقاوم سازی ساختمانهای موجود می باشد. حساسیت این موضوع با توجه به بافت فرسوده نقاط زلزله خیز، ساخت و ساز بدون رعایت استاندارد اجرایی و نیز استفاده از آئین نامه‌های طراحی قدیمی در دهه‌های گذشته دو چندان شده است. عدم وجود تیر در این دال‌ها، موجب سهولت اجرا، افزایش سرعت ساخت و ساز، افزایش ارتفاع خالص طبقه و کاهش ارتفاع کلی ساختمان می‌گردد. با این وجود خطر شکست ترد سوراخ کننده در اتصالات دال ستون باعث می‌شود که این سیستم‌ها مستعد خرابی پیش رونده‌ای باشند که با بروز گسیختگی در یک اتصال همراه است و به دلیل ماهیت ترد آن که فاقد علائم هشدار دهنده قبل از بروز می‌باشد مطلوب نیست [۶].

همچنین مشاهده شده است استفاده از دیوار برشی در هر دو جهت طولی و عرضی در قطعات داخلی دارای کمترین هزینه می‌باشد و همچنین استفاده از عناصر مقاوم بادبندی در خارج ساختمان و دیوار برشی در داخل ساختمان و یا عناصر مقاوم بادبندی در داخل ساختمان هزینه بیشتری نسبت به گزینه دیوار برشی دارد و استفاده از دیوار برشی مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و درجه اطمینان سازه را بشدت افزایش می‌دهد و باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سازه و کاهش تغییرشکل‌ها و خسارات وارد به دیگر اجزاء بتنی سازه می‌گردد [۳]. بهسازی لرزه‌ای از شاخه‌های نوین علم عمران می‌باشد که از چند دهه قبل در کشورهای پیشرفته صنعتی مورد توجه قرار گرفته است و در سال‌های اخیر با توجه به خسارات وارده در اثر زلزله‌های گذشته، در کشور ما نیز اهمیت ویژه‌ای به خود اختصاص داده است [۴]. با توجه به اینکه کشور ایران در روی کمربند الپ-همیالیا قرار دارد، در طول سال زلزله‌های مختلفی در نقاط مختلف

Abasqus استفاده خواهد شد. مشخصات مدل‌ها، پارامترهای موثر در جدول (۱) ارائه شده است، همچنین نیز مشخصات و ابعاد پلان سازه در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱) - مشخصات و پارامترهای موثر نمونه مطالعاتی

پارامتر موثر	تعداد طبقات	نام نمونه مطالعاتی
بدون تقویت	۳ طبقه	A-1
FRP تقویت با ورق		A-2
تقویت با غلاف بتنی		A-3
تقویت با غلاف فولادی		A-4



شکل (۲) - پلان سازه مورد مطالعه

جدول (۲) - مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۵ طبقه

طبقه	ابعاد ستون (سانتیمتر)	ابعاد تیر (سانتیمتر)
طبقه اول	مربع ۵۵×۵۵	مستطیل، ارتفاع ۵۰ عرض ۵۵
طبقه دوم	مربع ۵۰×۵۰	مستطیل، ارتفاع ۴۰ عرض ۵۰
طبقه سوم	مربع ۴۵×۴۵	مربع ۴۵×۴۵
طبقه چهارم	مربع ۴۰×۴۰	مربع ۴۵×۴۵
طبقه پنجم	مربع ۳۵×۳۵	مربع ۳۵×۳۵

بهشتی و متقی (۱۳۹۶) در تحقیقی روی ساختمان بتنی مسلح معیوب ۶ طبقه به این نتیجه رسیدند که یکی از جنبه‌های حوزه بهسازی فراهم آوردن امکان مقایسه بین گزینه‌های مختلف طراحی و بهسازی با استفاده از مفاهیمی چون عملکرد در مقابل فروریزش است. یک ساختمان بتنی ضعیف به دو روش مختلف، مهاربند فولادی و میراگر اصطکاکی بهسازی شده و مدلسازی کردند و با انتخاب ۱۵ شتابنگاشت، تحلیل دینامیکی فزاینده بر روی سه مدل مختلف انجام دادند. نتیجه گرفتند که روش‌های بهسازی مذکور احتمال فروریزش را در هر دو سطح عملکردی IO و CP کاهش می‌دهد. این در حالی است که با لحاظ کردن منحنی خطر لرزه‌های منطقه که در آن مشخصات سختی سازه در نظر گرفته شده است، نتایج متفاوتی حاصل می‌شود [۷].

بینیسی و بایراک ۲۰۰۳ روشی جدید برای افزایش ظرفیت برش سوراخ شونده دال‌ها ارائه نمودند. آنها ورقه‌های فولادی FRP را عمود بر صفحه دال در اطراف ستون و عمود بر صفحه آرماتورهای خمشی، به صورت آرماتور برشی در دال قرار دادند. آنها دور شدن صفحه مستعد ترک برشی از نزدیکی ستون و افزایش در حدود ۵۵ درصد در ظرفیت برش پنج را مشاهده نمودند. در سال‌های اخیر تقویت سازه‌های بتنی مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های FRP مورد توجه زیادی قرار گرفته که در این میان تقویت دال‌های دوطرفه به خصوص برای افزایش مقاوم سوراخ کننده کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیق دانشگاه رازی تقویت دال‌های تخت با استفاده از صفحات FRP و فولادی برای تقویت ظرفیت برش سوراخ شونده مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش الیاف مسلح پلیمری به صورت رکابی‌های بسته در ارتفاع دال قرار داده شد. افزایش مقاومت نهایی، ظرفیت تغییر مکان، انرژی جذب شده و شکل‌پذیری در تمامی نمونه‌ها مشهود شد [۸].

۲. مواد و روش

مدلی که در این تحقیق بررسی خواهد گردید سازه بتنی مسلح با دال تخت ۵ طبقه خواهد بود که در نرم افزار Etabs مدل‌سازی و تحلیل و طراحی خواهد شد. برای بررسی حالت‌های مقاوم‌سازی از نرم افزار اجزاء محدود

۱,۲ مشخصات مکانیکی بتن

برای تعریف بتن در نرم افزار اجزای محدود Abaqus، یک مدل رفتاری به نام مدل خمیری آسیب بتن^۱ وجود دارد. این مدل توانایی کلی برای مدلسازی رفتار بتن یا هر ماده دیگر با رفتار نیمه ترد را دارد. این مدل برای مدلسازی رفتار ناکشسان بتن، از مفهوم شکست ایزوتروپیک در محدوده کشسان در کنار رفتار فشاری در محدوده پلاستیک استفاده می‌نماید. در این پژوهش در مدل مورد بررسی، از بتن با مقاومت‌های فشاری ۲۵ مگاپاسکال استفاده شده است رفتار بتن از خاصیت کشسان و خمیری تبعیت می‌کند. در شکل (۳) نمودار تنش-کرنش بتن که در این پژوهش در مدلسازی نمونه‌ها استفاده خواهد شد نشان داده شده است.

جدول (۳) - مشخصات مکانیکی بتن نمونه مدلسازی گروه شمع

نام و نوع بتن	جرم مخصوص	مقاومت فشاری بتن
نوع ۱	۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع	۲۵ مگاپاسکال

۲,۲ - مشخصات مکانیکی میلگردها

در این تحقیق میلگرد فولادی از نوع S400 است. برای تعریف ساده‌تر رفتار غیرخطی مکانیکی میلگردهای فولادی، منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت دو خطی فرض شده است. بنابراین کافی است دو شیب به عنوان ضریب کشسانی اولیه و ثانویه و مقدار تنش جاری شدن مشخص گردد. مشخصات فولاد S400 مصرفی استفاده شده در این مدلسازی در جدول (۴ تا ۶) نشان داده شده است.

جدول (۴) - مشخصات مکانیکی میلگرد نمونه B

نوع میلگرد	ضریب کشسانی (Mpa)	جرم مخصوص Kg/m ³	ضریب پواسون
S400	2.05E10 ⁵	7850	0.3

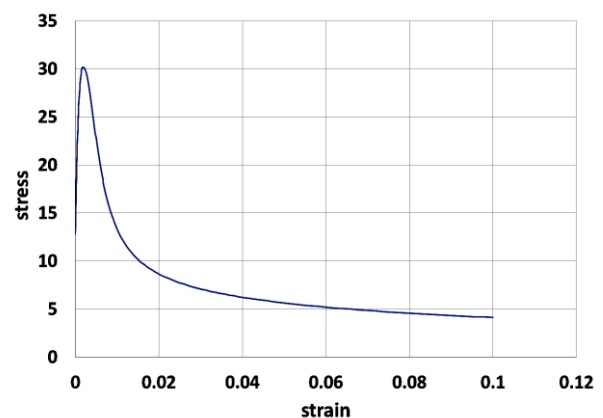
جدول (۵) - مشخصات ایزوتروپیک خطی مکانیکی فولاد

ضریب کشسانی (Mpa)	ضریب پواسون
2.05E10 ⁵	0.3

جدول (۶) - مشخصات ایزوتروپیک دو خطی مکانیکی فولاد

کرنش	تنش (MPa)
0	465
0.12	600

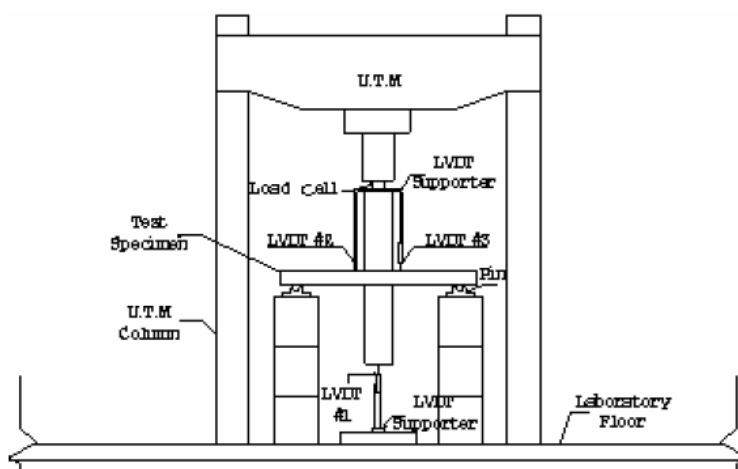
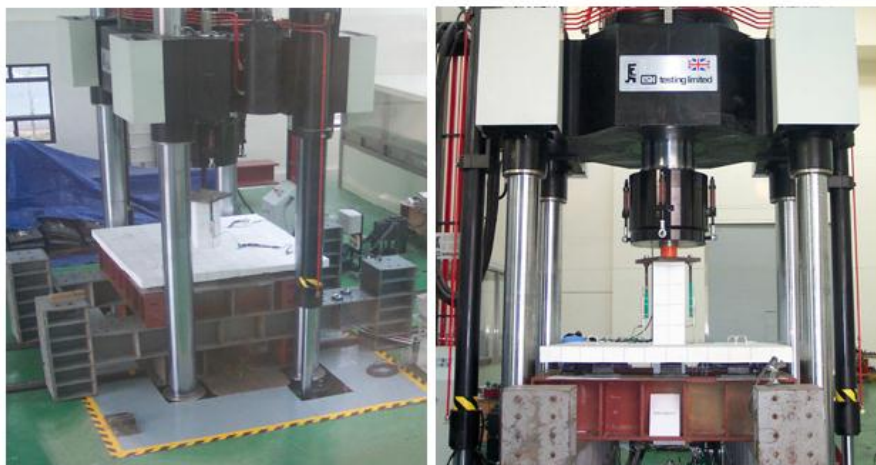
برای راستی آزمایی نمونه نرم افزاری برنامه Abaqus از مطالعات آزمایشگاهی یانگ سانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۴ استفاده گردید، بعد از مدلسازی نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار Abaqus و مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان اختلاف بسیار ناچیزی در حدود ۲/۴ درصد مشاهده شد، که در شکل‌های (۵ و ۶) نمونه آزمایشگاهی و نمودار نیرو تغییر مکان آنها نشان داده شده است.



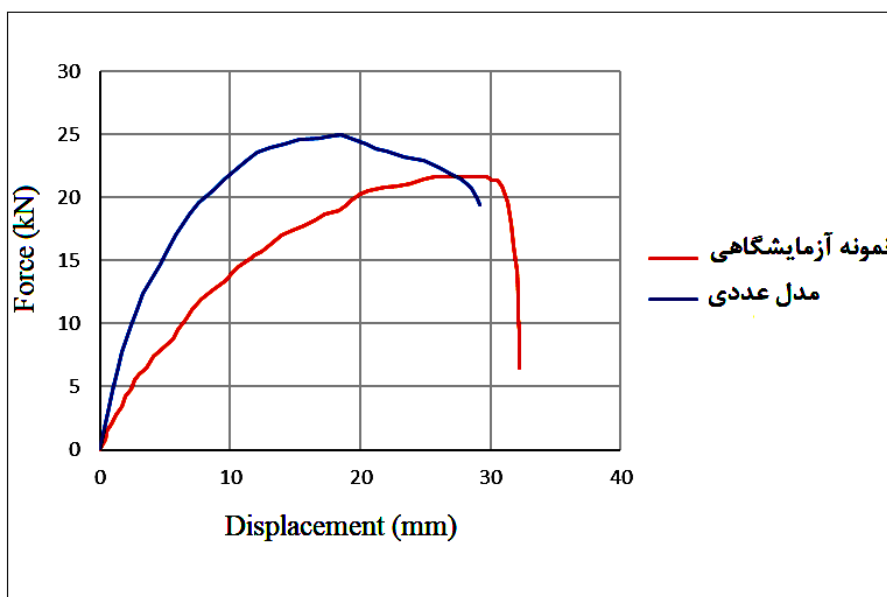
شکل (۳) - نمودار تنش-کرنش بتن مصرفی در مدلسازی نمونه‌ها

² young sang cho

¹ Concrete damaged plasticity

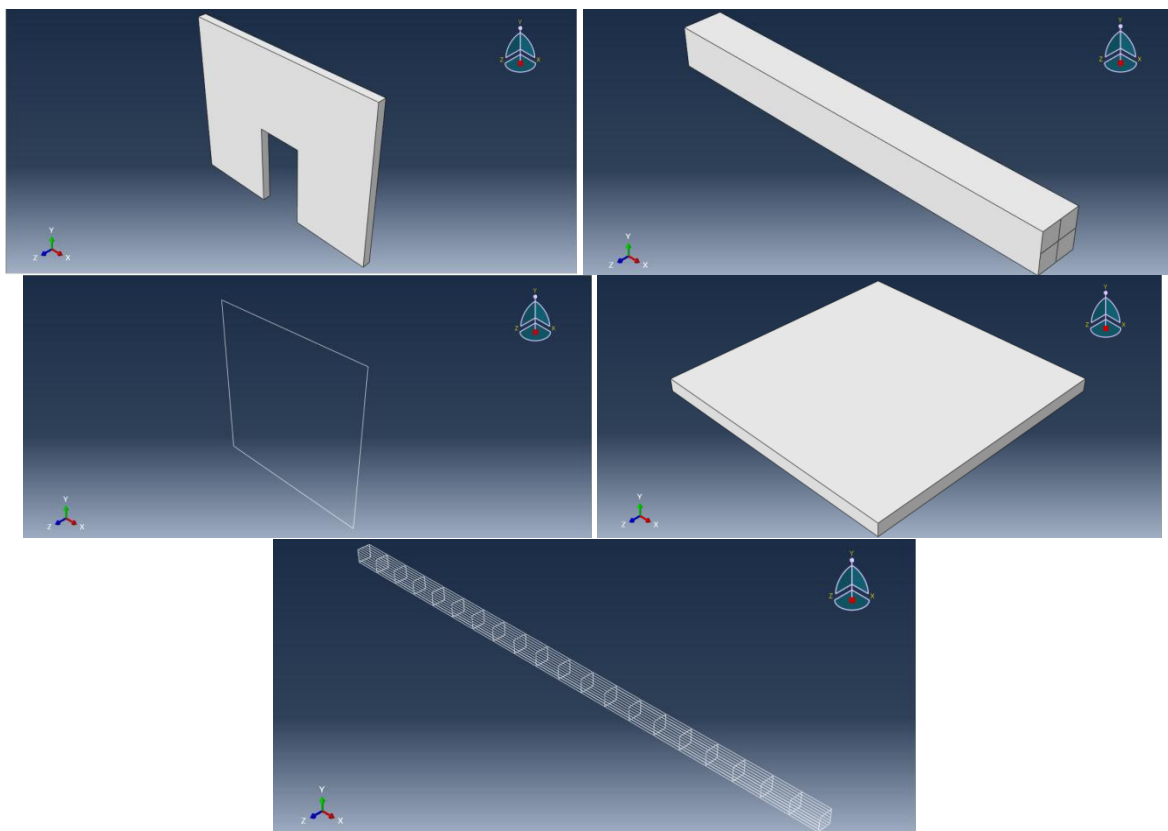


شکل (۴) - شکل هندسی نمونه صحت سنجی شده نمونه آزمایشگاهی یانگ سانگ و همکاران



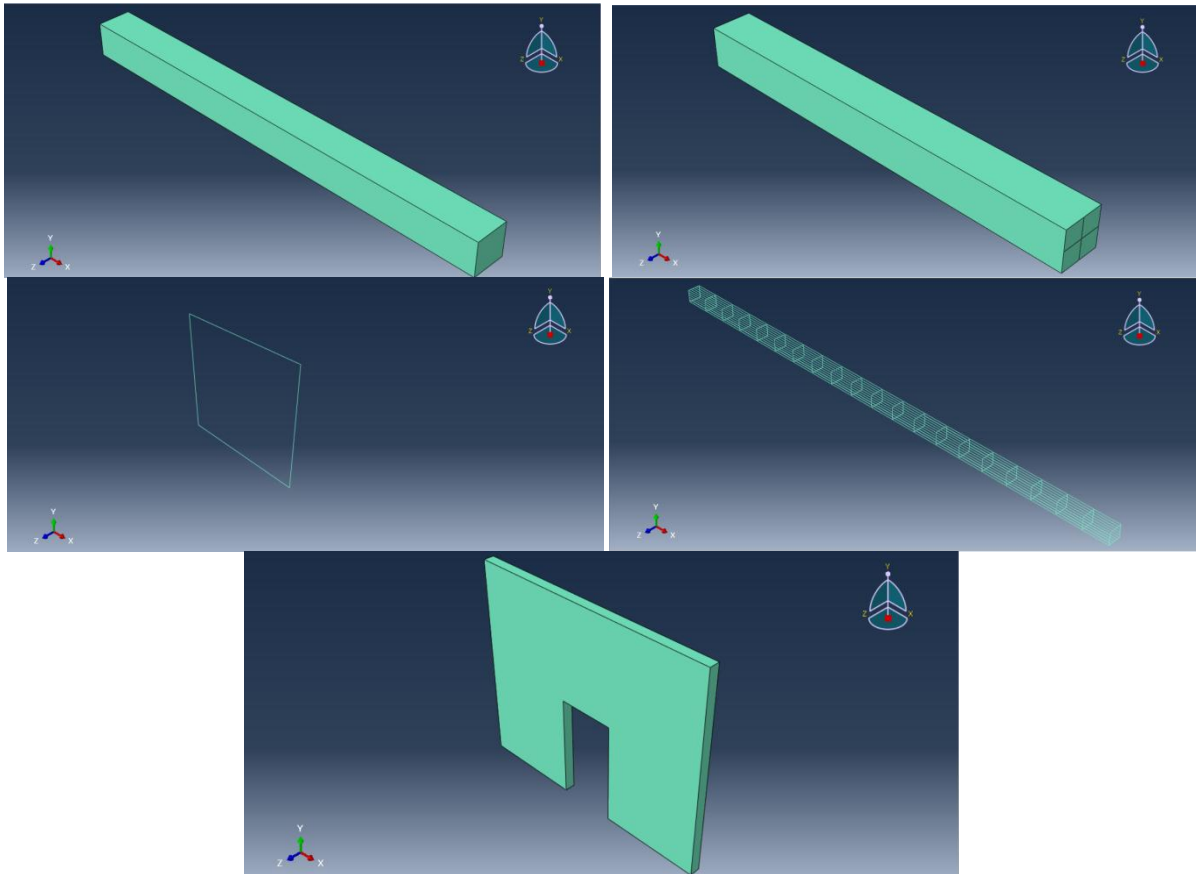
شکل (۵) - نمودار صحت سنجی نمونه آزمایشگاهی یانگ سانگ و همکاران و تحلیل عددی

جهت مدل‌سازی نمونه‌های طراحی شده، از نرم افزار اجزاء محدود Abaqus استفاده شد. جهت مدل‌سازی بتن از اجزاء Solid استفاده شد و جهت مدل‌سازی میلگردهای فولادی از اجزاء Wire استفاده گردیده است، در مرحله معرفی مشخصات مصالح در نرم افزار Abaqus رفتار مصالح در ناحیه خطی و غیرخطی لحاظ گردید. همچنین مشخصات مکانیکی میلگرد فولادی (S400)، و بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال استفاده شده است. برای اتصال تمامی صلب به یکدیگر از قید Tie و برای تعریف وضعیت سطح تمامی صفحات دارای تماس با یکدیگر از قید Contact به صورت سطح به سطح استفاده شد. می‌توان قسمت‌های ایجاد شده برای هندسه نمونه مطالعاتی در شکل (۶) مشاهده کرد.



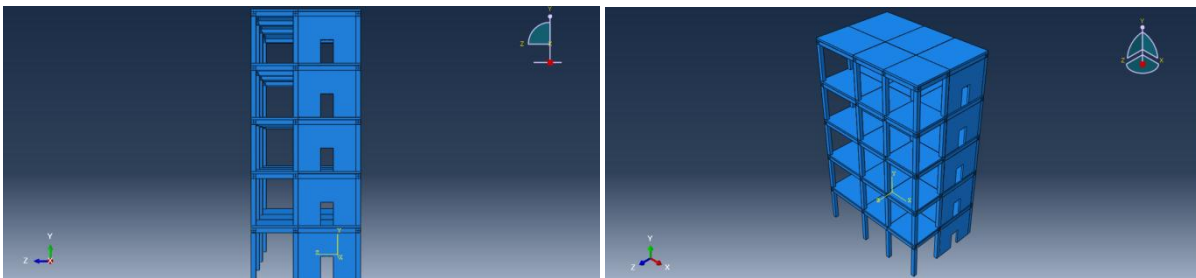
شکل (۶) - نمای اجزاء ایجاد شده مد در محیط گرافیکی برنامه Abaqus

برای مدل‌سازی قطعات بتنی از اجزاء Solid و میلگردهای فولادی از اجزاء Wire استفاده شد. ضریب کشسانی فولاد ۱۹۹ گیگاپاسکال و بتن مورد استفاده در این مدل‌سازی از بتن با رفتار محصور شده با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال برای مدل استفاده شد است. بعد از تعریف مشخصات مصالح بتن و فولاد در این قسمت اختصاص مصالح انجام می‌شود، بعد از اختصاص مشخصات مصالح قسمت‌های ایجاد شده به رنگ سبز در می‌آید، در شکل ۷ می‌توان اختصاص مصالح به مدل مورد نظر را مشاهده کرد.



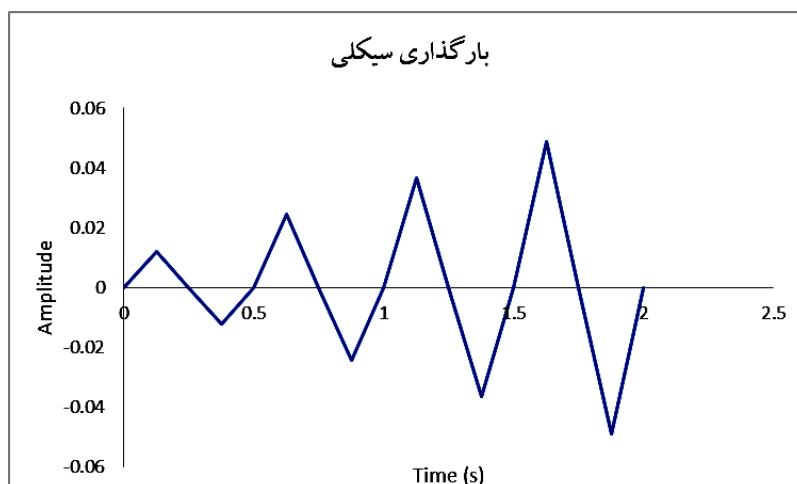
شکل (۷) - نمای قسمت‌های ایجاد شده در محیط اختصاص مصالح برنامه Abaqus

از قسمت Assembly برای مونتاژ مدل استفاده می‌شود، در این قسمت به تولید قسمت‌های هر قسمت از مدل پرداخت و آنها مونتاژ می‌گردد. بعد از اتمام مونتاژ مدل می‌توان شکل نهایی مدل را در محیط گرافیکی Assembly مشاهده کرد.

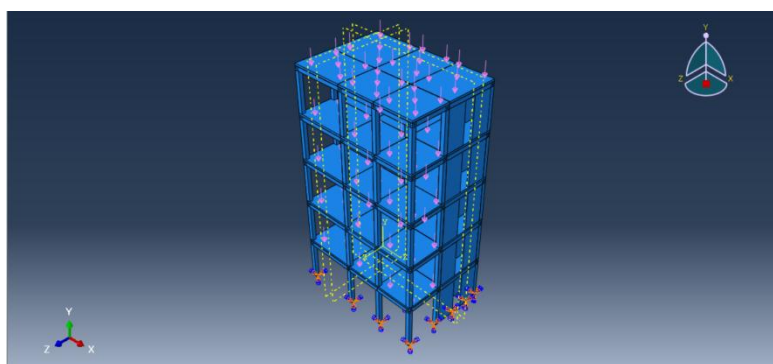


شکل (۸) - نمای مدل در محیط گرافیکی Assembly برنامه Abaqus

به منظور اعمال بارگذاری ثقلی مرده و زنده در قسمت بارگذاری^۱ از برنامه Abaqus نوع بارگذاری را از نوع ثقلی انتخاب می‌گردد، و برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای نمودار شکل (۹) برای تمامی نمونه‌ها تعریف می‌گردد.

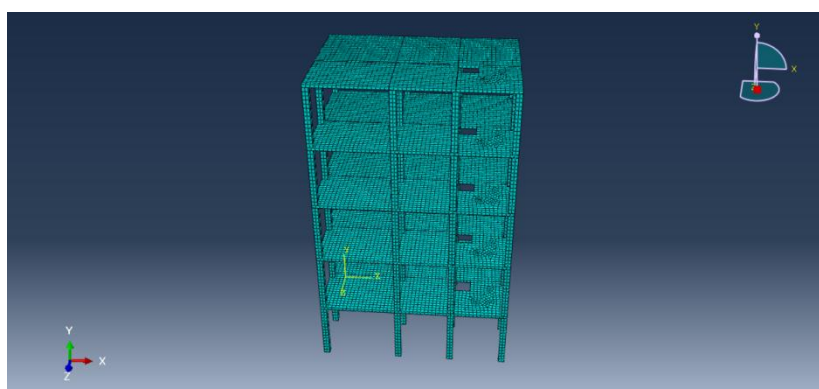


شکل (۹) - نمودار بارگذاری چرخه‌ای



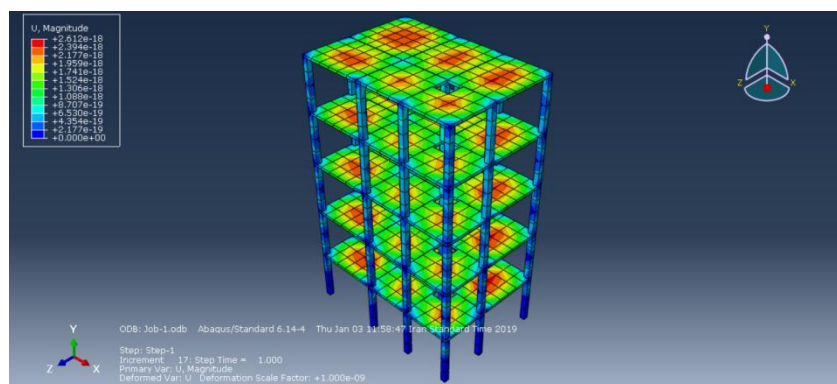
شکل (۱۰) - اعمال بار در محیط گرافیکی قسمت بارگذاری برنامه Abaqus

در قسمت شبکه کار مشبندی مدل انجام می‌شود، چشمه شبکه اختصاص داده شده ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، در شکل (۱۱) نحوه شبکه‌بندی ارائه شده است.



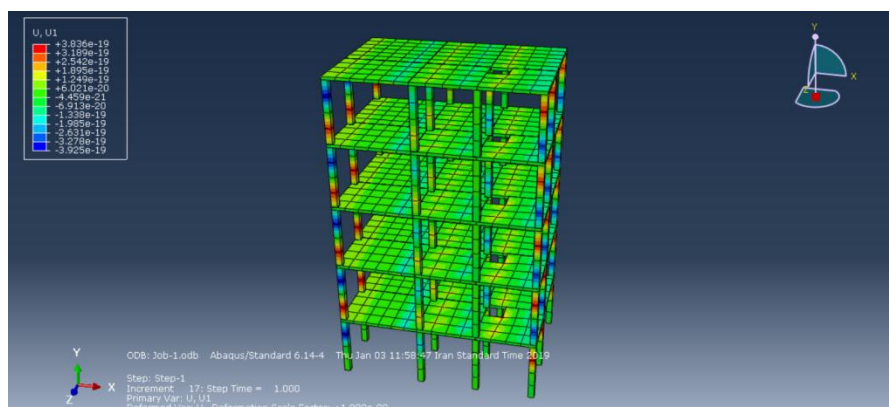
شکل (۱۱) - مدل شبکه شده در محیط گرافیکی برنامه Abaqus

بعد از انجام تحلیل با توجه به نوع بارگذاری چرخه‌ای برای مشاهده نتایج تحلیل می‌توان از محیط دیداری نرم افزار Abaqus استفاده کرد. در شکل (۱۲) الی (۱۵) می‌توان منحنی هم تراز پارامترهای تحلیل مدل را مشاهده کرد. در شکل (۱۲) منحنی هم تراز تغییرمکان کلی (U-magnitude) نمونه نشان داده شده است، که مشخص است در قسمت انتهایی و گوشه‌های خاک تغییرمکان‌های ترکیبی تحت بارهای انفجاری تغییر مکانی بیشتری دارد.



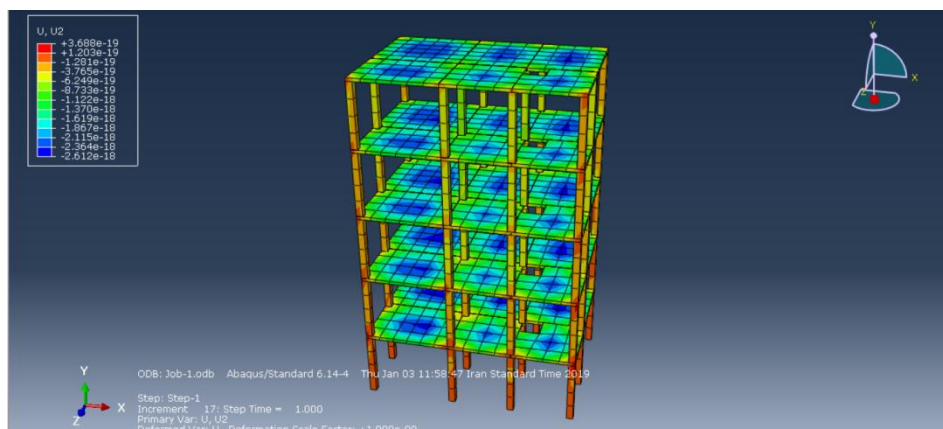
شکل (۱۲) - منحنی هم تراز توزیع تغییرمکان مدل (بدون تقویت)

بعد از انجام تحلیل تحت بار انفجاری در محیط برنامه Abaqus برای نمونه A-1 در شکل (۱۳) منحنی هم تراز تغییرمکان ارائه شده است. با تشریح و تحلیل منحنی هم تراز تنش می‌توان مشاهده کرد که بیشترین تغییرمکان در سطوح سقف در قسمت‌های میانی در مدل A-1 بدون تقویت ایجاد شده است.



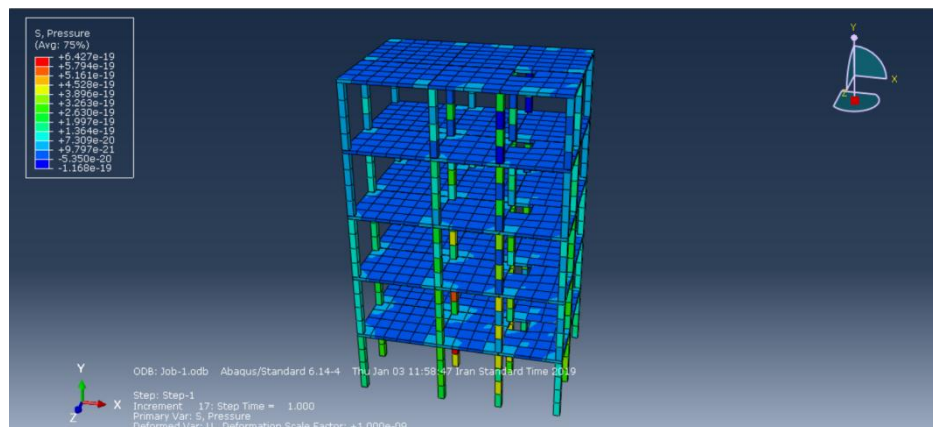
شکل (۱۳) - منحنی هم تراز توزیع تغییرمکان مدل (تقویت شده با غلاف فولادی)

با مشاهده منحنی هم تراز تغییرمکان نمونه A-2 که نمونه تقویت شده با ورق‌های فولادی است، مشاهده گردید که اثر تقویت ورق‌های فولادی باعث بهبود عملکرد سقف نسبت به حالت بدون تقویت است.



شکل (۱۴) - توزیع تغییرمکان در مدل (تقویت شده با غلاف بتنی)

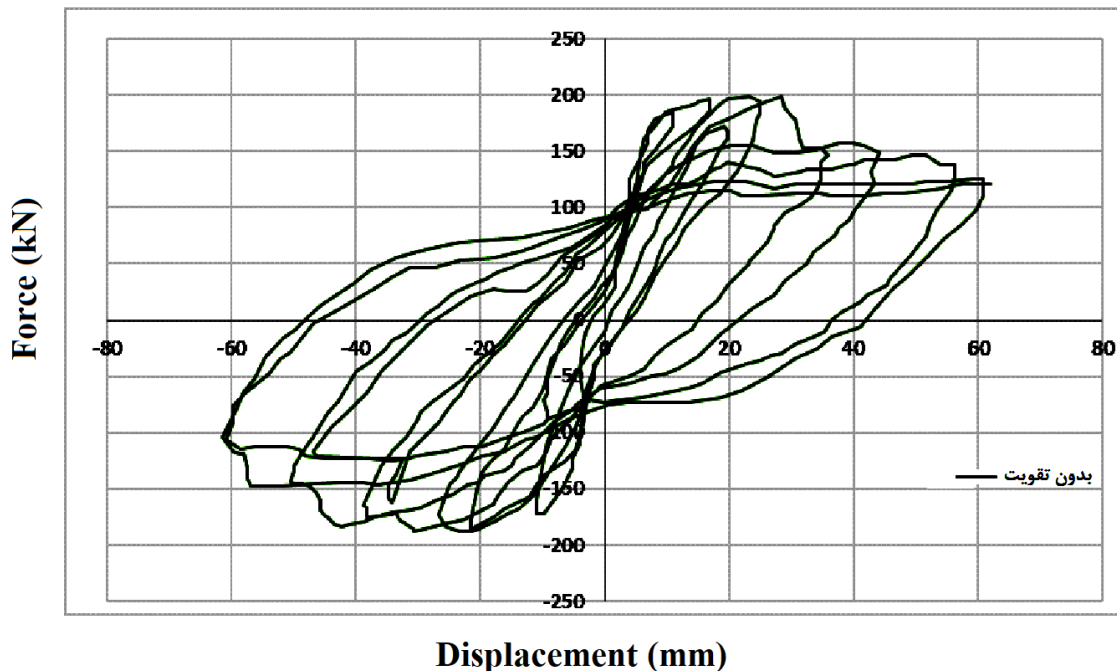
با بررسی شکل (۱۲) که منحنی هم تراز توزیع تغییرمکان برای نمونه A-3 که اثر تقویت شده با غلاف بتنی می‌باشد، مشاهده می‌گردد که عملکرد غلاف بتنی نسبت به غلاف فولادی بهتر بوده و سازه عملکرد مناسب‌تری را از خود نشان می‌دهد که این موضوع با بازتوزیع تغییرمکان نشان داده شده است.



شکل (۱۵) - توزیع تغییرمکان مدل (تقویت شده با الیاف FRP)

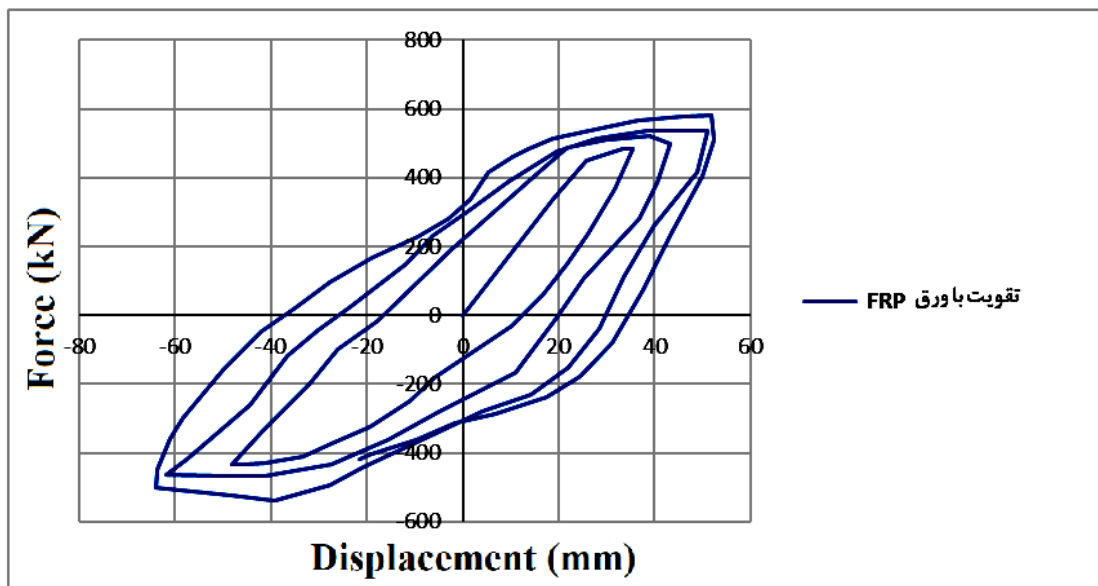
۴. نتایج تحلیل عددی

بعد از انجام مدل‌سازی نمونه تحلیلی در محیط برنامه Abaqus، نمودار منحنی هیستریزس سازه از محیط گرافیکی دیداری برنامه خروجی گرفته می‌شود. در شکل‌های (۱۶ الی ۱۹) می‌توان نمودار هیستریزس هر چهار نمونه را مشاهده کرد. در نمودار شکل (۱۶) مشخص شده است که نمونه بدون تقویت حداکثر ظرفیت نیرویی که می‌تواند تحمل کند مقدار ۱۴۲/۶۲ نیوتن به ازای جابجایی ۶۱/۲ سانتی متر را تحمل کند.



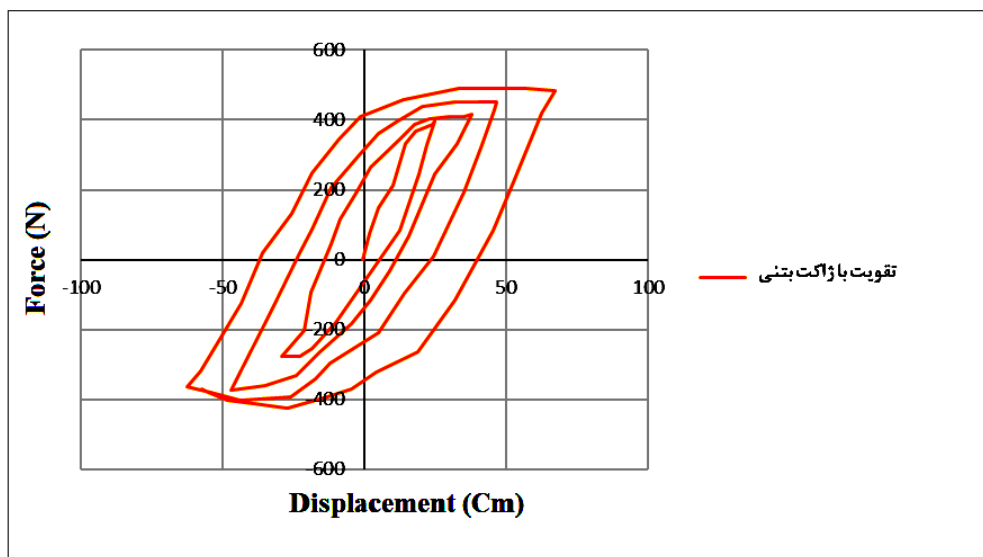
شکل (۱۶) - نمودار هیستریزس مدل (بدون تقویت)

در نمودار شکل (۱۷) که نمودار هیستریزیس نمونه تقویت شده با غلاف فولادی تحت تحلیل نمونه ارائه شد، مشخص شده است که نمونه با تقویت توسط ورق های FRP ظرفیت نیرویی آن افزایش می یابد که این مقدار حداکثر برابر است ۵۹۱/۳۴ نیوتن به ازای جابجایی ۴۲/۶۱ سانتی متر است.



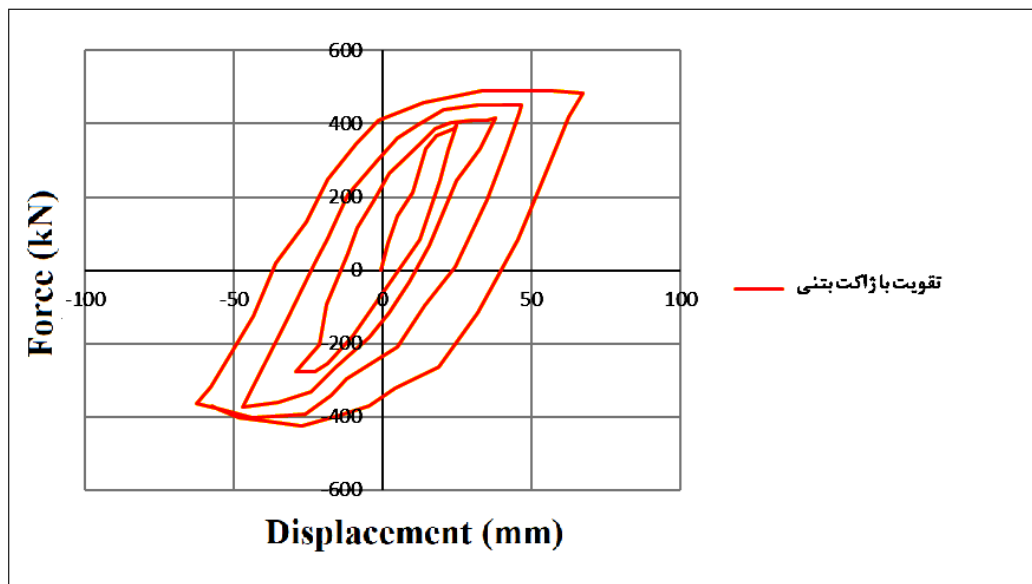
شکل (۱۷) - نمودار هیستریزیس مدل (تقویت شده با الیاف FRP)

در نمودار شکل (۱۸) که نمودار هیستریزیس نمونه تقویت شده با غلاف بتنی تحت تحلیل نمونه ارائه شد، مشخص شده است که نمونه با تقویت توسط غلاف بتنی ظرفیت نیرویی آن نسبت به نمونه بدون تقویت افزایش می یابد که این مقدار حداکثر برابر است ۴۸۹/۵۱ نیوتن به ازای جابجایی ۵۱/۳۱ سانتی متر است.



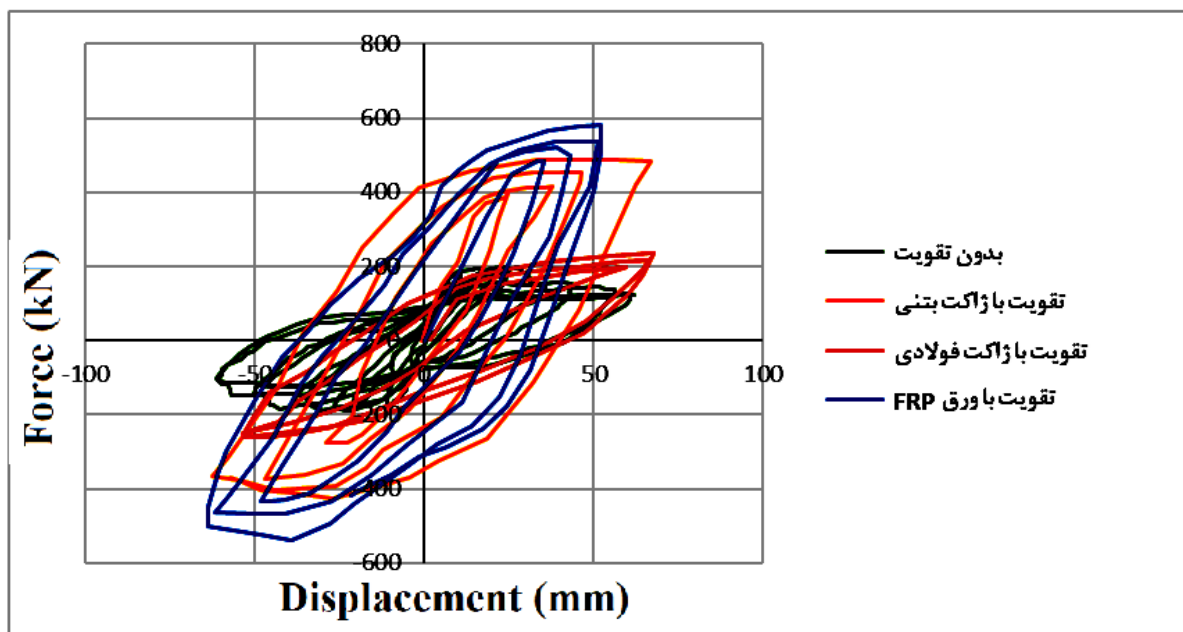
شکل (۱۸) - نمودار هیستریزیس مدل (تقویت شده با غلاف بتنی)

در نمودار شکل (۱۹) که نمودار هیستریزیس نمونه تقویت شده با غلاف فولادی تحت تحلیل نمونه ارائه شد، مشخص شده است که نمونه با تقویت توسط غلاف بتنی ظرفیت نیرویی آن نسبت به نمونه بدون تقویت افزایش می‌یابد که این مقدار حداکثر برابر است $231/71$ نیوتن به ازای جابجایی $68/85$ سانتی متر است.



شکل (۱۹) - نمودار هیستریزیس مدل (تقویت شده با غلاف فولادی)

در شکل (۲۰) نمودار قیاسی هیستریزیس نمونه های مطالعاتی بدون تقویت، تقویت شده با ورق فولادی، تقویت شده با غلاف بتنی و تقویت شده با ورق الیاف FRP را ارائه شده است، با مقایسه هر نمونه نسبت به یکدیگر مشخص می‌شود که نمونه تقویت شده با ورق FRP بشیترین و بهترین رفتار مکانیکی را از خود نشان می‌دهد، بعد از ورق FRP حالتی که بهترین رفتار را از خود نشان می‌دهد، حالت تقویتی با غلاف بتنی است که بعد از حالت تقویتی با ورق الیافی FRP بهترین روش را از خود نشان می‌دهد، و در انتها که حالت تقویت شده با غلاف فولادی ضعیف ترین رفتار مکانیکی را از خود نشان می‌دهد.



شکل (۲۰) - نمودار قیاسی هیستریزیس نمونه های تحلیلی

۵. نتیجه‌گیری

با توجه نمودار مدل بدون تقویت و مدل تقویت شده مشاهده شد که مقدار مقاومت مقطع مدل تقویت شده به طور میانگین $23/85\%$ بیشتر از مقاومت مقطع بدون تقویت است. همچنین مقدار سختی مقطع و مدل تقویت شده به طور میانگین $18/2\%$ بیشتر از سختی مدل بدون تقویت بود، همچنین نیز مقدار شکل پذیری مدل تقویت شده به طور میانگین $16/34\%$ بیشتر از شکل پذیری مدل بدون تقویت است

- با توجه به نمودار هیستریزس مدل با تقویت غلاف فولادی نسبت به غلاف بتنی مشاهده شد، که مقاومت مقطع مدل تقویت شده با غلاف بتنی $12/8\%$ نسبت مدل تقویتی با غلاف فولادی بیشتر می‌باشد. همچنین مقدار سختی مقطع و مدل تقویت شده با غلاف بتنی $10/75\%$ بیشتر از سختی مقطع مدل با تقویت غلاف فولادی می‌باشد و شکل پذیری مدل تقویت شده با غلاف بتنی $11/75\%$ درصد بیشتر از شکل پذیری مدل با تقویت غلاف فولادی می‌باشد.

- با توجه به بررسی نمودار هیستریزس مدل با تقویت ورق FRP نسبت به غلاف بتنی مشاهده گردید، که مقدار مقاومت مدل تقویت شده با ورق FRP $16/28\%$ بیشتر از مقاومت مقطع مدل با تقویت غلاف بتنی است، مقدار سختی مدل تقویت شده با ورق FRP $35/16\%$ بیشتر از سختی مقطع مدل با تقویت غلاف بتنی است. همچنین شکل پذیری مقطع مدل تقویت شده با ورق FRP $72/14\%$ بیشتر از شکل پذیری مقطع مدل با تقویت غلاف بتنی است.

۶. مراجع

- [۱] بررسی تاثیر ابعاد و محل قرارگیری بازشوها بر صلبیت و انعطاف پذیری دال های بتنی توخالی (کوبیاکس)، کورش دهقان، سیدعلیرضا کازرونیان چهارمین کنگره علمی پژوهشی افق های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران تهران، ۱۳۹۵
- [۲] بهرویان، منوچهر (۱۳۹۰) بررسی راه کارهای بهسازی در ساختمان های بتنی با قاب خمشی جهت ارتقاء سطح عملکردی و انطباق آن با ضوابط مقررات ملی ساختمان (مبحث ۹۰۶) و نشریه ۳۶۰، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز
- [3] Zhenmin Wang, (2006). *Understanding seismic hazard and risk assessments: An Example in the new Madrid seismic zone of the central United States, proceedings of the 8th U.S. national conference on Earthquake Engineering, April 18-22 2006, San Francisco, California. USA, paper no.416.*
- [۴] کمیته‌ی بازنگری آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، عنوان: «آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰»، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم، نشریه‌ی شماره ض - ۲۵۳، چاپ ششم، سال چاپ: ۱۳۸۴، صفحات ۱۲۵ تا ۱۳۵.
- [۵] امیر مسعود کی‌نیا، عنوان: «آنالیز و طراحی سازه‌های بتن مسلح»، انتشارات جهاد سازندگی واحد دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ هشتم، تاریخ چاپ: پاییز ۱۳۷۸.
- [۶] معاونت امور فنی و تدوین معیارها، عنوان: «آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا) - بخش دوم»، ناشر: سازمان برنامه و بودجه، ویرایش دوم: نشریه‌ی شماره‌ی ۱۲۰. ماهنامه‌ی دانش نما، شماره ۱۷۱-۱۷۰، تیر - مرداد.
- [۷] بهشتی اول، بهرام، متقی، لیدا. (۱۳۹۶) اثر خطر زلزله منطقه بر انتخاب روش بهسازی یک قاب بتن مسلح معیوب. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۳
- [8] Binici B, Bayrak O. *Punching shear strengthening of reinforced concrete flat plates using carbon fiber reinforced polymers. Journal of Structural Engineering, ASCE 129:9 (2003) 1173-1182.*

ارزیابی استفاده از ضایعات شیشه در تولید بتن - مروری بر تحقیقات گذشته



دینا محمدی باغشاهی
کارشناسی مهندسی عمران،
دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب



بابک احمدی
عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



محمد شکرچی زاده
استاد دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه تهران، سرپرست انستیتو
مصالح ساختمانی دانشگاه تهران
عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی



محمد جواد محمدی
دانشجوی کارشناسی ارشد
مهندسی عمران، دانشکده
مهندسی عمران، دانشگاه
تهران

چکیده

بتن به عنوان یکی از مصالح مصرفی ساخت بشر جایگاه ویژه‌ای در بین مهندسین عمران دارد و در سراسر جهان به دلیل افزایش هزینه‌های دفع، نگرانی‌های زیست محیطی و توجه به توسعه پایدار استفاده از ضایعات شیشه در سیمان و بتن علاقه زیادی به خود جلب کرده است. شیشه حاوی مقادیر نسبتاً زیادی از سیلیس و کلسیم است که امکان استفاده از آن را در تولید سیمان پرتلند و بتن فراهم کرده است. استفاده از شیشه خرد شده به عنوان سنگدانه برای بتن تاثیر منفی بر خواص مکانیکی و دوام دارد. نگرانی اصلی برای استفاده از شیشه خرد شده به عنوان سنگدانه برای بتن با سیمان پرتلند، ترک خوردگی و انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) ضایعات شیشه در بتن است. شیشه ضایعاتی می‌تواند به صورت درشت‌دانه، ریزدانه و یا پودر شیشه در بتن استفاده شود که وجود شیشه ضایعاتی به عنوان ریزدانه و درشت دانه می‌تواند باعث ایجاد واکنش ASR شده و وجود پودر شیشه در بتن می‌تواند اثر ASR را کاهش دهد. با توجه به تحقیقات گذشته نتایج بدست آمده نشان می‌دهد درصد جایگزینی بهینه شیشه خرد شده ضایعاتی به عنوان ریزدانه در بتن تا ۳۰ درصد می‌باشد و در نسبت بیش از ۳۰ درصد، شیشه خرد شده ضایعاتی تاثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن می‌گذارد. تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از پودر شیشه با درصد بهینه امکان دستیابی به بتن با مقاومت‌های بالا و دوام مناسب می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن، ضایعات شیشه، سنگدانه شیشه‌ای، پودر شیشه، مشخصات مکانیکی و دوام

۱- مقدمه

در سال در جوامع صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این میزان استفاده تا سال ۲۰۵۰ در حدود ۱۸ میلیارد تن در سال پیش‌بینی می‌شود که باعث مصرف بالای مواد طبیعی و انرژی، افزایش دمای اتمسفر زمین و انتشار گاز دی اکسید کربن در اثر تولید سیمان می‌شود [۱]. در این راستا اهمیت به توسعه پایدار برای کاهش خطرات زیست محیطی مورد توجه قرار می‌گیرد.

بتن به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در ساخت و ساز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. نیاز به تولید مصالح اولیه برای ساخت بتن، باعث کاهش ذخایر سنگدانه‌های طبیعی و افزایش آلاینده‌گی حاصل از تولید سیمان می‌گردد. در حال حاضر سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن

بر اساس تعریف سازمان ملل، توسعه پایدار^۱ به معنی «برآوردن نیازهای نسل حاضر بدون به خطر انداختن قابلیت‌های نسل آینده به گونه‌ای که نیازهای نسل کنونی نیز به مخاطره نیافتد» می‌باشد. در راستای این مفهوم، یکی از گام‌های اولیه، استفاده بهینه از مواد و مصالح محدود موجود در طبیعت است به نحوی که بتوان حداکثر مقاومت و دوام را بدست آورد. مقدار سیمان زیاد بتن‌ها باعث افزایش آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن (CO₂) در اتمسفر (۵ تا ۷ درصد)، مصرف زیاد انرژی (۱/۴ گیگاژول در یک تن سیمان پرتلند) و ایجاد گازهای گلخانه‌ای می‌شود که مجموعه این عوامل باید در راستای اهداف توسعه پایدار تعریف گردد. بنابراین ضروری است تا به موضوع کاهش اثرات مخرب در بتن بیش‌ازپیش پرداخته شود [۲، ۳].

سازمان ملل در برنامه محیط زیستی خود (UNEP)^۲ دو راهکار کلی ارائه داده است که عبارتند از: استفاده از مواد جایگزین سیمان و افزایش دوام و عمر مفید سازه‌ها. از سویی دیگر، نگرانی‌های رو به رشد زیست محیطی و کمبود فضا برای دفن زباله باعث ترویج بازیافت و استفاده از آن شده است [۴].

استفاده از مواد ضایعاتی در مصالح ساختمانی به خصوص بتن به دلیل اهمیت حفظ محیط زیست، کاهش آلودگی‌ها، کاهش برداشت از مصالح سنگی و نیز احتمال بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن، همواره مد نظر بوده است. در این میان استفاده از ضایعات شیشه در انواع مختلف، در دو دهه قبل مورد توجه و مطالعه محققین قرار گرفته است [۵، ۶]. در سال‌های اخیر به دلیل گسترش صنعتی شدن و بهبود استانداردهای زندگی، مقدار زباله‌های شیشه‌ای در حال افزایش می‌باشد. اکثر این ضایعات به علت عدم وجود شرایط مناسب جمع‌آوری، قابل بازیافت نبوده و باعث ایجاد اتلاف در منابع طبیعی و آلودگی زیست

محیطی می‌شود. شیشه می‌تواند چندین بار بدون تغییر در خواصش بازیافت شود و دوباره برای تولید شیشه استفاده گردد. اثر این عملکرد بستگی به شیوه جمع‌آوری و جداسازی شیشه‌ها با رنگ‌های مختلف دارد. اگر شیشه را نتوان جداسازی کرد و چنانچه رنگ‌های مختلفی وجود داشته باشد نمی‌توان بازیافت کرد و باید از آن در مصارف دیگر مثل بتن استفاده کرد.

ضایعات شیشه به عنوان درشت‌دانه، ریزدانه و همچنین پودر و یا مواد جایگزین سیمان می‌تواند به بتن اضافه گردد و واکنش‌های متفاوتی با ترکیبات بتن داشته که بر کیفیت بتن تاثیر می‌گذارد. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد کاربرد شیشه به عنوان بخشی از درشت‌دانه مناسب نمی‌باشد زیرا واکنش شیمیایی مخرب قلیایی سیلیسی رخ می‌دهد. در حالی که پودر شیشه و یا پوزولان‌های دیگر می‌تواند انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های واکنش‌زا و خرده شیشه را متوقف کند [۷].

ضایعات خرده شیشه با اندازه‌های مطابق استاندارد شن و ماسه در ساخت راه‌ها و ساختمان‌ها برای ساخت کاشی، آجر و بلوک مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین محققان بیان نمودند که استفاده از شیشه بسیار ریز شده در بتن می‌تواند مزایای اقتصادی مناسبی را به همراه داشته باشد [۸].

بنابراین لازم است که اثر دانه‌بندی، ابعاد و درصد استفاده از مواد شیشه‌ای در بتن مورد بررسی قرار گیرد تا بهینه‌ترین و کارآمدترین ترکیب بدست آید. بدین منظور در این مقاله بر اساس مطالعات و آزمایش‌های محققین پیشین به بررسی خواص انواع شیشه و ضایعات حاصل از آن و امکان استفاده از شیشه‌ها با دانه‌بندی و اندازه‌های مختلف در بتن برای کسب خواص مکانیکی متفاوت پرداخته شده است.

در شکل ۱ نمونه‌هایی از ضایعات شیشه مورد استفاده در بتن قابل مشاهده می‌باشد.

¹ Sustainable Development

² United Nations Environment Programme



شکل ۱- ضایعات شیشه

۲- مشخصات و ویژگی‌های شیشه

اولین تولیدات شیشه در بین‌النهرین در حدود ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد آغاز شد و اولین ظروف شیشه‌ای حدود ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد ساخته شد که در آن زمان به علت کیفیت پایین تر خاک رس، حرارت کم و کوره‌های کوچک، ساخت شیشه پرهزینه و بی‌کیفیت بود. اختراع نیچه بوری تولید شیشه را راحت‌تر و سریع‌تر کرد و در دسترس عموم قرار داد. شیشه بی‌رنگ اولین بار، در طول قرن اول بعد از میلاد از طریق اکسید منگنز ظهور پیدا کرد و در سال ۱۶۷۴ جورج راونسکروف^۱، شیشه ساز انگلیسی با استفاده از اکسید سرب در مواد خام با مقادیر زیاد، شیشه سربی را بوجود آورد. در سال ۱۹۱۰ شیشه سه لایه با روش ورقه ورقه کردن توسط محقق فرانسوی^۲ تولید شد. روند پیشرفت تولید شیشه به سرعت صورت گرفت تا امروزه تولید شیشه در انواع مختلف انجام شود. [۹، ۱۰].

براساس تعریف استاندارد آمریکا (ASTM C162)^۳، شیشه ماده‌ای غیر آلی است که از حالت مذاب به صورتی سرد می‌شود که بدون تبلور به صورت صلب بدست می‌آید. امروزه شیشه‌ها از نظر ترکیب و خواص تنوع بسیاری دارند.

اشکال مختلفی از شیشه برحسب ترکیب شیمیایی و مواد افزودنی استفاده شده تولید می‌شود که عمده‌ی آن‌ها شیشه سودا آهکی (soda lime)، سربی و بوروسیلیکات می‌باشد. مانند سیلیس شیشه، سیلیکات قلیایی، شیشه‌های

سودا آهکی (بطری، شیشه درب و پنجره، لامپ)، شیشه بوروسیلیکات (لوازم آزمایش‌های شیمیایی، مواد دارویی و عایق کردن تنگستن)، شیشه سربی (جداره داخلی تلویزیون رنگی، ریسه نئونی، قطعات الکترونیکی و عدسی متراکم نوری)، شیشه باریم (پانل تلویزیون رنگی و عدسی متراکم بایمی)، شیشه آلومینیوسیلیکات (لوله احتراق، فایبرگلاس و پایه‌های مقاومت‌های الکتریکی) این شیشه‌ها در سه رنگ متفاوت، عمدتاً سبز، قهوه‌ای و بی‌رنگ تولید می‌شود [۱۱]. نمونه ترکیب‌های شیمیایی مختلفی برای تولید شیشه با کاربردهای متفاوت در جدول ۱ ذکر شده است.

صنعت شیشه مقدار زیادی از منابع طبیعی زمین را به عنوان مواد خام استفاده می‌کند. برآورد شده است که برای تولید یک کیلوگرم از سطح صاف شیشه ۱/۷۳ کیلوگرم مواد خام و ۰/۱۵ متر مکعب آب مصرف می‌شود و همچنین تولید هر تن محتوی شیشه ۱/۲ تن از مواد خام گران را مصرف می‌کند [۱۲]. بدین منظور بازیافت و استفاده مجدد از آن مزیت‌های محیط زیستی و اقتصادی دارد. میزان بازیافت ضایعات شیشه در تمام جهان نسبتاً کم و عمدتاً متمرکز بر بخش ظروف و بسته‌بندی است. در ایالات متحده ۱۱/۵ میلیون تن از ضایعات شیشه در سال ۲۰۱۰ تنها با نرخ بازیافت ۲۷٪ تولید شده است [۱۳]. در حالیکه کل ضایعات شیشه در کشورهای عضو اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۸ تنها با نرخ بازیافت ۶۰٪ حدود ۴/۱ میلیون تن تخمین زده شده است.

¹ Ravenscroft

² Edouard Benedictus

³ American Society for Testing and Materials

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی شیشه‌های تجاری [۱۱]

Glasses and uses	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO	Others
Soda-lime glasses										
Containers	66-75	0.7-7		12-16	0.1-3	0.1-5	6-12			
Float	73-74			13.5-15	0.2	3.6-3.8	8.7-8.9			
Sheet	71-73	0.5-1.5		12-15		1.5-3.5	8-10			
Light bulbs	73	1		17		4	5			
Tempered ovenware	75	1.5		14			9.5			
Borosilicate										
Chemical apparatus	81	2	13	4						
Pharmaceutical	72	6	11	7	1					
Tungsten sealing	74	1	15	4						
Lead glasses										
Color TV funnel	54	2		4	9				23	
Neon tubing	63	1		8	6				22	
Electronic parts	56	2		4	9				29	
Optical dense flint	32			1	2				65	
Barium glasses										
Colour TV panel	65	2		7	9	2	2	2	2	10% SrO
Optical dense barium crown	36	4	10						41	9% ZnO
Aluminosilicate glasses										
Combustion tubes	62	17	5	1		7	8			
Fiberglass	64.5	24.5		0.5		10.5				
Resistor substrates	57	16	4			7	10	6		

با افزودن CaO در کنار Na₂O به سیلیس می‌توان شیشه‌های قابل قبول تجاری ساخت که ۹۰ درصد شیشه‌های تجاری را تشکیل می‌دهند. وجود درصد بالای Na₂O سبب بروز ضعف در خواص شیشه‌ها از نظر مقاومت شیمیایی کم و پایین بودن استحکام مکانیکی می‌شود. همچنین افزایش درصد CaO به بهای کاهش درصد Na₂O می‌تواند نقطه ضعف ذکر شده را کاهش دهد و باعث بهبود خواص گردد.

شیشه دارای ساختار بی‌شکل بوده و دارای سیلیس زیادی است و این دو پیش‌نیازهای اولیه جهت یک ماده پوزولانی می‌باشد که در شیشه وجود دارد. مطابق ASTM C1866 اگر ریزی ذرات شیشه به زیر ۴۵ میکرون برسد می‌تواند خاصیت پوزولانی داشته باشد. در جدول ۳ مشخصات شیمیایی سیمان و ضایعات شیشه با رنگ‌های مختلف و همچنین ماسه مقایسه شده است.

ساختار تجدید ناپذیری این ماده باعث شده است که به عنوان زباله دور ریخته شود و این در حالی است که در صنعت سیمان و بتن می‌توان یک مدیریت سازگار با محیط زیست زباله‌های شیشه‌ای فراهم شود.

چگالی شیشه تقریباً در حدود ۲/۲ تا ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. چگالی شیشه به وجود گروه‌های هیدروکسیل، دمای سرد شدن شیشه و سرعت سرد شدن (ضریب انبساط حرارتی حجمی) مرتبط می‌باشد. مدول الاستیسیته شیشه در حالت کشش در حدود ۶۸۶۰۰ تا ۷۳۵۰۰ مگاپاسکال است و با افزایش دمای تولید این مقدار افزایش می‌یابد. مدول برشی شیشه ۸۰۰ مگاپاسکال است. ضریب پواسون آن تقریباً ۰/۱۶ تا ۰/۱۷ می‌باشد. همچنین شیشه‌ها معمولاً دارای مقدار انبساط حرارتی کمی می‌باشد. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین مشخصات فیزیکی ضایعات شیشه و ماسه انجام شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی ضایعات شیشه و ماسه [۱۴]

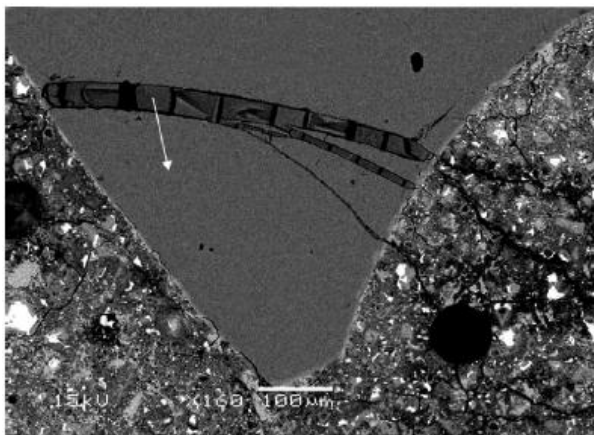
مشخصات فیزیکی	شیشه ضایعاتی	ماسه
چگالی	۲/۱۹	۲/۵۷
وزن مخصوص خشک (Kg/m ³)	۱۶۷۲	۱۶۸۸
جذب آب %	۰/۳۹	۲/۷۱
شاخص پوزولانی %	۸۰	-

شیشه ماده‌ای است که در برابر خوردگی شیمیایی بسیار مقاوم است زیرا مقادیر فلزات قلیایی آن بسیار اندک است.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان و رنگ‌های مختلف ضایعات شیشه [۱۵]

ترکیب شیمیایی	سیمان %	شیشه شفاف	شیشه قهوه ای	شیشه سبز	شیشه خرد شده	پودر شیشه	ماسه
SiO_2	۲۰/۲	۷۲/۴۲	۷۲/۲۱	۷۲/۳۸	۷۲/۶۱	۷۲/۲۰	۷۸/۶
Al_2O_3	۴/۷	۱/۴۴	۱/۳۷	۱/۴۹	۱/۳۸	۱/۵۴	۲/۵۵
CaO	۶۱/۹	۱۱/۵۰	۱۱/۵۷	۱۱/۲۶	۱۱/۷۰	۱۱/۴۲	۷/۱۱
Fe_2O_3	۳/۰	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۴۸	۲/۴۷
MgO	۲/۶	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۴۶
Na_2O	۰/۱۹	۱۳/۶۴	۱۳/۷۵	۱۳/۵۲	۱۳/۱۲	۱۲/۸۵	۰/۴۲
K_2O	۰/۸۲	۰/۳۵	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۶۴
SO_3	۳/۹	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۹	-
TiO_2	-	۰/۰۳۵	۰/۰۴۱	۰/۰۴	-	-	۰/۱۵
Loss on ignition	۱/۹	-	-	-	۰/۲۲	۰/۳۶	۷/۶

اشباع شیشه و قلیایی‌های مخلوط بتن است که به واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) معروف می‌باشد. این واکنش می‌تواند برای پایداری بتن بسیار خطرناک باشد. در اثر واکنش مذکور ژل مخصوصی در اطراف سنگدانه‌های حاوی سیلیس فعال از جمله شیشه تشکیل می‌گردد که در برابر رطوبت کافی، از خود انبساط نشان داده و به شدت متورم شده و تغییر حجم می‌دهد. که باعث ایجاد ترک‌های بسیار ریز در ساختار بتن و در اطراف سنگدانه می‌گردد، که منجر به کاهش چشمگیر مقاومت بتن می‌شود [۷، ۱۷، ۱۸]. شکل ۲ عکس گرفته شده از تاثیر ASR بر ذرات شیشه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- عکس گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی و تاثیر ASR بر ذرات شیشه [۱۸]

۳- استفاده از ضایعات شیشه در تولید سیمان و بتن

همانطور که اشاره شد یکی از کاربردهای ضایعات شیشه که مورد توجه محققین قرار گرفته است، استفاده در بتن به عنوان سنگدانه یا جایگزین سیمان می‌باشد. استفاده از ضایعات شیشه در بتن کمک زیادی به حفظ محیط زیست و استفاده مجدد از موادی می‌نماید که دیگر قابلیت استفاده در صنعت شیشه را نخواهد داشت.

۱.۳. سنگدانه شیشه‌ای

استفاده از سنگدانه شیشه‌ای و ترکیب آن‌ها از نظر اقتصادی نیز بصرفه خواهد بود. سنگدانه‌های شیشه‌ای جاذب رطوبت نیستند و برای سازه‌هایی که محدودیتی برای استفاده از مصالح خاص ندارند، قابل استفاده می‌باشد. سنگدانه‌های شیشه‌ای تحت عوامل جوی و رطوبت دچار اضمحلال نمی‌شوند و تحت تاثیر رطوبت آب‌های زیر زمینی، سطحی و سایر عوامل مقاومت خود را از دست نمی‌دهند و مقاومت سایشی بتن را افزایش می‌دهد. از آن جایی که شیشه جاذب رطوبت نیست، لزوم استفاده از فوق روان‌کننده و روان‌کننده را در بتن‌های گوناگون، تا حد زیادی کاهش می‌دهند [۱۶، ۱۷].

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مورد استفاده از شیشه در بتن وجود دارد، واکنش شیمیایی ما بین ذرات سیلیس

استنشاق و بریدگی وجود دارد که اجرا در محیط مرطوب و استفاده از ابزار ایمنی می‌توان باعث کاهش خطرات اجرایی شود [۲۵].

وانگ و هانگ (۲۰۱۰) در تحقیق خود به بررسی خواص بتن خودتراکم حاوی شیشه‌های LCD با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۲۸، ۰/۳۲ و ۰/۳۶، چهار درصد جایگزینی صفر، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ شیشه و استفاده از خاکستر بادی پرداختند. نتایج نشان داد که جریان اسلامپ بتن حاوی شیشه، با افزایش جایگزینی شیشه، افزایش می‌یابد. زیرا نوع شیشه LCD آب‌گریز می‌باشد. همچنین کارایی بتن در آزمایش‌های قیف V و جعبه U افزایش می‌یابد [۲۶]. بنابراین نتیجه گرفتند که تولید بتن خودتراکم با استفاده از ضایعات شیشه امکان‌پذیر می‌باشد.

تاپکو و کنباز^۱ (۲۰۰۴) ضایعات شیشه را به صورت درشت‌دانه با ابعاد ۴ تا ۱۶ میلیمتر و با نسبت‌های صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درصد در بتن مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ضایعات شیشه اثر قابل توجهی بر کارایی نداشت و مقاومت بتن را به میزان کمی کاهش داد. با توجه به آنالیز هزینه انجام شده، بتن با ضایعات شیشه هزینه بسیار کمتری داشت [۲۰].

پارک و لی (۲۰۰۴) مقدار مقاومت فشاری و خمشی را در ملات حاوی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد از شیشه ضایعاتی ریزدانه در اندازه ۳ تا ۴/۷۵ میلیمتر که با بخشی از ماسه جایگزین شده است را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش مقدار شیشه ضایعاتی ریزدانه مقاومت فشاری و خمشی کاهش می‌یابد [۸].

لینگ و همکاران (۲۰۱۱) همان نتیجه فوق را با درصد جایگزینی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد از شیشه ضایعاتی ریزدانه در اندازه ۳ تا ۴/۷۵ میلیمتر دست یافتند [۲۷].

به منظور مقابله با اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی در بتن با ترکیبات شیشه، به طور کلی روش‌هایی پیشنهاد شده است:

- ۱- استفاده از مواد پوزولانی مناسب مانند خاکستر بادی، سرپاره، میکروسیلیس با نسبت‌های مناسب
 - ۲- استفاده از راهکارهای مقاوم کردن شیشه در برابر محیط مخرب مثل آغستن با محلول زیرکونیوم
 - ۳- آب بند کردن بتن در برابر رطوبت با هدف محدود کردن واکنش ASR
- بدین منظور جهت مقابله با پیشرفت واکنش ASR، روش‌های مختلف که محققین در تحقیق ارائه دادند، در جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۴- روش‌های مختلف برای کاهش واکنش ASR

روش حفاظت	نویسنده و مرجع
افزافه کردن ۱۰ درصد متاکائولن یا خاکستر بادی	لام و همکاران [۱۹]
افزافه کردن ۱۰ تا ۲۰ درصد خاکستر بادی، اضافه کردن ۱ تا ۲ درصد کربنات لیتیم	توپکا و همکاران [۲۰]
افزافه کردن ۱۰ تا ۳۰ درصد متاکائولن	لینگ و همکاران [۲۱]
افزافه کردن ۳۰ درصد خاکستر بادی، ۶۰ درصد سرپاره، ۱۰ درصد میکروسیلیس، ۱/۵ تا ۲ درصد الیاف فولادی، ۰/۵ تا ۲ درصد ترکیبات لیتیم	دو و تان [۲۲]
افزافه کردن سرپاره و ۱۰ درصد متاکائولن و ۱ درصد تیترا لیتیم	طاها و نونا [۱۵]
افزافه کردن ۱۰ درصد متاکائولن و ۵۰ درصد خاکستر بادی	لی و همکاران [۲۳]
استفاده از شیشه ضایعاتی خرد شده هنگامی که در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۰ دقیقه حرارت داده شده	مرچی و همکاران [۲۴]

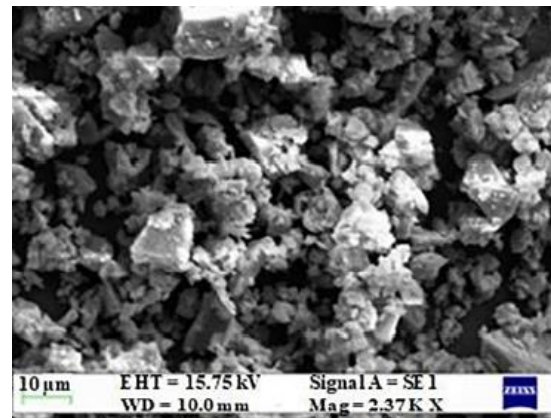
یکی دیگر از معایب استفاده از سنگدانه‌های شیشه‌ای در بتن، پیوند ضعیف بین شیشه و خمیر است. برای جلوگیری از این اتفاق باید شیشه را تا حدی خرد کرد و یا به صورت پودر درآورد. علاوه بر این خطرات ناشی از اجرا مانند

¹ Topcu and Canbaz

اما در مقاله ای از تورگات و یاهلی زاده (۲۰۰۹)، دانه‌های شیشه جایگزین درشت‌دانه و ریزدانه شدند نتایج حاکی از آن بود که استفاده از ریزدانه‌های شیشه‌ای به جای ریزدانه‌های معمولی موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. مقدار جایگزینی مناسب، طبق مشاهدات ۲۰ درصد عنوان شد [۲۸].

۲.۳. پودر شیشه

پودر شیشه ماده‌ای با ارزش است که از شیشه‌های غیر قابل بازیافت بدست می‌آید. استفاده از پودر شیشه باعث کاهش اثر واکنش مخرب قلیایی سیلیسی (ASR) در بتن می‌شود [۲۹]. شکل ۳ تصویری از پودر شیشه ضایعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر SEM از پودر شیشه ضایعاتی

چن و هوانگ^۱ نیز در تحقیقات خود از پودر شیشه با اندازه ۱۶۰ و ۷۵ میکرون استفاده کردند که به عنوان جایگزین ماسه باعث افزایش ۳۰ و ۴۱ درصدی مقاومت ۲۸ و ۹۱ روزه می‌شود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که می‌توان از شیشه پودر شده به عنوان بخشی از ریزدانه در مخلوط‌های سیمانی استفاده نمود به شرط آن که اندازه ذرات شیشه کمتر از ۷۵ میکرون باشد که در این حالت خاصیت پوزولانی نشان می‌دهد [۳۰]. علاوه بر آن آزمایش ریزساختار نمونه‌ها نشان داد که پودر شیشه باعث بهبود

دوام و کاهش نفوذپذیری بتن می‌گردد [۳۱]. همچنین آن‌ها دریافتند که می‌توان از پودر شیشه تا ۳۰ درصد سیمان یا سنگدانه در مخلوط بتن بدون هیچگونه خرابی ناشی از ASR استفاده کرد.

کاسار و کامیلری^۲ (۲۰۱۲) از پودر شیشه و خرده شیشه در بتن با نسبت جایگزینی ۱۰٪ تا ۵۰٪ سیمان استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پودر شیشه نسبت به خرده شیشه اتصال قوی‌تر و احتمال کمتر واکنش ASR دارد. همچنین با افزایش مقدار شیشه مقاومت فشاری و خمشی کاهش می‌یابد [۳۲].

سروشیان و ناسار (۲۰۱۲) مقاومت و دوام بتن حاوی خرده بتن بازیافتی و شیشه آسیاب شده جایگزین سیمان را بررسی کردند. پودر شیشه با اندازه ذرات ۱۳ میکرون به میزان ۲۰٪ جایگزین سیمان و سنگدانه بازیافتی با اندازه متوسط ۱۹ میلیمتر جایگزین سنگدانه طبیعی شد. نمونه‌ها با دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و ۰/۵ ساخته شد. نتایج نشان داد که افزودن شیشه اسلایم را افزایش و به دلیل خاصیت پرکنندگی منافذ و واکنش پوزولانی باعث بهبود مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید شده است [۳۳].

ویتکویکیوس^۳ و همکاران (۲۰۱۴) از پودر شیشه حاصل از بطری‌های بازیافتی در بتن فوق‌توانمند استفاده و به طور کامل آن را جایگزین پودر کوارتز و میکروسیلیس کردند. نتایج نشان دهنده بهبود ریز ساختار و خصوصیات مقاومت فشاری بود. پودر شیشه تا مقیاس میکرو دارای واکنش پوزولانی کمی است اما به عنوان فعال کننده، انحلال فازهای کلینکر را تسریع می‌سازد و کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) تشکیل می‌دهد. این واکنش‌ها اثرات مثبت روی خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری دارد. آن‌ها نشان دادند که دستیابی به مقاومت فشاری بالای ۴۰

² Cassar and Camilleri

³ Vaitkevicius

¹ Chen and Huang

مگاپاسکال با ترکیب پودر شیشه و میکروسیلیس امکان پذیر می‌باشد [۲۹].

شایان و زو (۲۰۰۴) مطالعات کاملی را در زمینه استفاده از پودر شیشه بجای سیمان و سنگدانه با درصدهای جایگزین مختلف در بتن معمولی انجام دادند. نتایج نشان دهنده پتانسیل زیاد ضایعات شیشه برای استفاده در بتن به صورت‌های مختلف به ویژه به صورت پودر شیشه می‌باشد. با استفاده از پودر شیشه تا ۳۰٪ جایگزینی سیمان، افزایش مقاومت فشاری و بهبود ریز ساختار حاصل شد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که می‌توان شیشه را تا ۵۰٪ جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه کرد و به مقاومت هدف ۳۲ مگاپاسکال رسید [۳۴].

تحقیقی که شوارز و همکاران (۲۰۰۹) بر روی نمونه‌هایی که با ۱۰ درصد پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان انجام دادند نشان داد که این موضوع موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود که دلیل آن افزایش سرعت واکنش هیدراسیون سیمان می‌باشد. همچنین از نظر افزایش مقاومت، بتن ساخته شده با پودر شیشه روند افزایشی بالایی را از خود برجا گذاشت که یکی از نقاط قوت آن نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با مواد دیگر مانند خاکستر بادی بود [۳۵].

با بررسی تمامی این مقالات می‌توان به این نتیجه مهم دست یافت که مقاومت فشاری بتن با پودر شیشه جایگزین به عنوان جایگزین بخشی از سیمان تأثیرپذیری مستقیم از درصد جایگزینی این ماده دارد. به طور کلی، در بین موارد آزمایش شده مقدار ۲۰ درصد جایگزینی مناسب‌ترین و پربازده‌ترین درصد جایگزینی معرفی شده است.

خمیری^۱ و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) اثر اندازه ذرات شیشه ضایعاتی، خواص پوزولانی شیشه و خواص بتن را با نسبت ثابت ۲۰٪ جایگزین بخشی از سیمان را مورد

بررسی قرار دادند. چهار اندازه مختلف از ذرات ظروف نوشابه شیشه‌ای را به عنوان بخشی از سیمان (کوچکتر از ۱۰۰ میکرون، کوچکتر از ۸۰ میکرون، کوچکتر از ۴۰ میکرون و کوچکتر از ۲۰ میکرون) را مورد استفاده قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش اندازه ذرات شیشه ضایعاتی مقاومت فشاری بتن حاوی شیشه کاهش یافته است. مقاومت فشاری نمونه حاوی شیشه ضایعاتی با اندازه ۲۰ میکرون از نمونه بدون شیشه حدود ۲٪ بیشتر به دست آمد. پس از ۹۰ روز عمل آوری نتایج نشان داد که ضایعات شیشه با اندازه ۲۰ میکرون دارای خواص پوزولانی بوده در نتیجه باعث بهبود خواص بتن می‌گردد [۳۶، ۳۷]. به طور کلی دسته‌بندی اندازه ذرات شیشه در جدول ۵ بیان شده است

جدول ۵- اندازه ذرات شیشه ضایعاتی

میزان اندازه ذرات	محصول
۴/۷۵ تا ۱۲ میلی‌متر	درشت‌دانه شیشه
۰/۱۵ تا ۴/۷۵ میلی‌متر	ریزدانه شیشه
کمتر از ۱۰ میکرون	پودر شیشه

ژی و ژن (۲۰۰۲) [۳۸] و چن و همکاران (۲۰۰۲) [۳۹]. استفاده از ضایعات شیشه را به عنوان یکی از مواد اولیه برای تولید سیمان پرتلند مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به ترکیب شیمیایی مشابه بین شیشه ضایعاتی و خاک رس، محققان سعی به استفاده از ضایعات شیشه به عنوان جایگزین بخشی از خاک رس [۳۸] یا به جای کل خاک رس [۳۹] را در سیمان داشتند. تمام مواد خام در آسیاب شیشه با اندازه کمتر از ۷۵ میکرون برای تولید یک مخلوط همگن استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت فشاری سیمان تولید شده حاوی ضایعات شیشه نسبت به سیمان معمولی کاهش یافته است. تجزیه و تحلیل پرتو اشعه X نشان داد سیمان تولید شده حاوی شیشه ضایعاتی به هیچ وجه نمی‌تواند مواد معدنی کلینکر تولید کند و محققان نتیجه گرفتند که شیشه ضایعاتی می‌تواند به

¹ Khmiri

و شیمیایی سیمان حاوی شیشه ضایعاتی با سیمان بدون شیشه در جدول ۶ ارائه شده است.

۴- جمع بندی

در این قسمت، جهت جمع بندی تاثیرات ضایعات شیشه بر خصوصیات بتن تازه و سخت شده، نتایج محققین در جدول های ۷ الی ۱۱ مقایسه شده است.

عنوان یک ماده خام برای تولید سیمان اما با کسری کوچک مورد استفاده قرار بگیرد زیرا محتوای قلیایی بالا در شیشه ضایعاتی موجود می باشد. چن و همکاران (۲۰۰۲) [۳۹]، استفاده از نه رنگ مختلف از بطری های شیشه ضایعاتی به عنوان مواد اولیه برای تولید سیمان پرتلند به جای خاک رس را مورد بررسی قرار دادند. خواص فیزیکی

جدول ۶- خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان حاوی شیشه ضایعاتی با سیمان بدون شیشه [۳۹]

سیمان شیشه ضایعاتی	سیمان پرتلند	ترکیبات شیمیایی
۰/۲۰	۰/۱۰	Na_2O
۰/۳۱	۰/۳۲	K_2O
۰/۴۰	۰/۳۱	Total alkali
۲/۴۷	۲/۴۹	SO_3
۱/۲۰	۱/۲۵	Free lime
۲۱/۳	۲۰/۷	SiO_2
۶۵/۱	۶۵/۲	CaO
۳/۳۷	۳/۳۳	Fe_2O_3
۵/۳۷	۴/۹۶	Al_2O_3
۰/۶۱	۰/۵۷	MgO
۵۵/۶	۶۲/۷	C_3S
۳۰/۴	۳۰/۸	Blaine
۹۴/۴	۹۳/۵	Fineness
۲۰/۳	۲۱/۹	2 day(mpa)

جدول ۷- تاثیر ضایعات شیشه بر میزان کارایی

نویسندگان	مقدار شیشه (%)	اندازه شیشه (میلیمتر) - جایگزین	اثر
تان و دو [۴۰]	۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵	کوچک تر از ۴/۷۵	منفی
لیمباچیا [۴۱]	۵۰، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۵۰	کوچک تر از ۵	منفی
دکاسترو و دبیرتو [۴۲]	۲۰، ۱۰، ۵	کوچک تر از ۴	منفی
چن و همکاران [۳۰]	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰	۰/۳۸ تا ۰/۳ و ۴۰ درصد کوچکتر از ۰/۱۵	منفی
بتینا و همکاران [۴۳]	۲۰، ۱۵، ۱۰ و ۵	کوچک تر از ۴/۷۵	بدون اثر
علی و آل ترساوی [۴۴]	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰	۰/۷۵ تا ۵	مثبت
پناچو و همکاران [۴۵]	۲۰، ۵۰ و ۱۰۰	۰/۱۴۹ تا ۲/۳۸	مثبت
لینگ و پون [۴۶]	۱۰۰	۶۰ درصد کوچکتر از ۲/۳۶ و ۴۰ درصد ۲/۳۶ تا ۵	مثبت
لینگ و پون [۴۷]	۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵	۲۳ درصد ۵ تا ۱۰	مثبت

جدول ۸- تاثیر ضایعات شیشه بر خواص مکانیکی بتن

اثر	اندازه شیشه (میلیمتر) - جایگزین	مقدار شیشه (%)	نویسندگان
منفی	کوچکتر از ۵	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰	لیمباچیا [۴۱]
منفی	۰/۰۷۵ تا ۵	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰	علی و آل ترسوی [۴۴]
منفی	کوچکتر از ۴	۵، ۱۰ و ۲۰	دکاسترو و دبریتو [۴۲]
منفی	۰/۵ تا ۳	۶۰	برهان و همکاران [۴۸]
منفی	۰/۱۵ تا ۴/۷۵	۳۰ و ۴۰	گواتام و همکاران [۴۹]
مثبت	کوچکتر از ۴/۷۵	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰	بتینا و همکاران [۴۳]
مثبت	کوچکتر از ۰/۷۵	۴۰	چن و همکاران [۳۰]
مثبت	۰/۵ تا ۳	۲۰	برهان و همکاران [۴۸]
مثبت	۰/۱۵ تا ۴/۷۵	۱۰ و ۲۰	گواتام و همکاران [۴۹]
مثبت	صفر تا ۱/۱۸	۱۰، ۲۰ و ۳۰	تورگات و همکاران [۲۸]

جدول ۹- تاثیر ضایعات شیشه بر میزان جذب آب

اثر	اندازه شیشه (میلیمتر)	مقدار شیشه (%)	نویسندگان
منفی	۲۳ درصد ۵ تا ۱۰	۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰	لینگ و پون [۴۷]
منفی	کوچکتر از ۵	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰	لیمباچیا [۴۱]
منفی	صفر تا ۴/۷۵	۱۰، ۲۰ و ۳۰	تورگات و همکاران [۲۸]
مثبت	کوچکتر از ۴	۵، ۱۰ و ۲۰	دکاسترو و دبریتو [۴۲]
مثبت	۶۰ درصد کوچکتر از ۲/۳۶ و ۴۰ درصد ۲/۳۶ تا ۵	۱۰۰	لینگ و پون [۴۶]
مثبت	۴/۷۵ تا ۱/۱۸	۱۰، ۲۰ و ۳۰	بهنداری و تجینه [۵۰]

جدول ۱۰- تاثیر ضایعات شیشه بر جمع‌شدگی

اثر	اندازه شیشه (میلیمتر)	مقدار شیشه (%)	نویسندگان
منفی	۶۰ درصد کوچکتر از ۲/۳۶ و ۴۰ درصد ۲/۳۶ تا ۵	۱۰۰	لینگ و پون [۴۶]
منفی	۰/۱۴۹ تا ۲/۳۸	۱۰۰	پناچو و همکاران [۴۵]
منفی	کوچکتر از ۴	۵ و ۲۰	دکاسترو و دبریتو [۴۲]
بدون اثر	۰/۱۴۹ تا ۲/۳۸	۲۰ و ۵۰	پناچو و همکاران [۴۵]
مثبت	کوچکتر از ۴/۷۵	۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰	تان و دو [۴۰]
مثبت	۲۳ درصد ۵ تا ۱۰	۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰	لینگ و پون [۴۷]
مثبت	کوچکتر از ۴	۱۰	دکاسترو و دبریتو [۴۲]
مثبت	کوچکتر از ۵	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰	لیمباچیا [۴۱]

جدول ۱۱- تاثیر ضایعات شیشه بر مشخصات مکانیکی و دوام در تحقیقات اخیر

نویسندگان	مقدار (%)	نوع	اثر
بستانسی و همکاران [۵۱]	۱۵	ریزدانه	عدم تفاوت قابل توجه
لو و پون [۵۲]	۱۰۰ تا ۲۵	ریزدانه	افزایش کارایی و مقاومت در برابر آتش، کاهش مقاومت فشاری
بیشت و رامانا [۵۳]	۱۸ تا ۲۴	ریزدانه	تا ۲۱٪ شیشه قابل قبول می‌باشد
وانگ و وانگ [۵۴]	۱۰ تا ۳۰	ریزدانه	مقاومت برابر و یا کمی بالاتر
یو و همکاران [۵۵]	۶۵ تا ۸۵	ریزدانه	افزایش مقاومت
اتیوبی و صادیق [۵۶]	۱۰ تا ۳۰	ریزدانه	تا ۲۰٪ شیشه بدون تغییر در مقاومت می‌باشد
هوی و مین [۵۷]	۱۰ تا ۳۰	چسبنده	تا ۱۰٪ شیشه قابل قبول می‌باشد
حاجی محمدی و همکاران [۵۸]	۳۰	ریزدانه	بدون تغییر در مقاومت، افزایش کاهش وزن
خان و خان [۵۹]	۱۰ تا ۳۰	چسبنده	تا ۳۰٪ شیشه قابل قبول می‌باشد

۵. مراجع

- [۱] ه. فامیلی، "تولید سیمان و بتن از دیدگاه حفظ منابع طبیعی و محیط زیست"، چهارمین کنفرانس سدسازی، ۱۳۷۹.
- [۲] م. شکرچی زاده و ز. میرزایی، "آموزش مهندسی بتن و سیمان با رویکرد توسعه پایدار و حفظ محیط زیست"، نشریه دانشکده فنی، ۲۰۱۰.
- [3] W. C. on Environment, Development, and G. H. Brundtland, *Presentation of the Report of the World Commission on Environment and Development to the Commission of the European Communities, the EC and EFTA Countries...* 5 May 1987, Brussels. World Commission on Environment and Development, 1987.
- [4] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2–26, 2018.
- [5] M. Adaway and Y. Wang, "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete- Effects on compressive strength," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 116–122, 2015.
- [6] M. Pattengil and T. C. SHUTT, "Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque symposiums on Utilization of Waste Glass in Secondary Products," Albuquerque, New Mexico, USA, 1973.
- [7] C. Meyer, S. Baxter, and W. Jin, "Alkali-silica reaction in concrete with waste glass as aggregate," in *Materials for the New Millennium*, 1996, pp. 1388–1397.
- [8] S.-B. Park and B.-C. Lee, "Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers," *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1152, 2004.
- [9] K. Dan and L. Ward, "The history of Glass," *Orbis: London, UK*, 1984.
- [10] R. M. Knittle, *Early American Glass*. Garden City Publishing Company, 1948.
- [11] E. B. Shand, C. H. Greene, and J. A. Grant, "Glass engineering handbook," 1958.
- [12] M. Ruth and P. Dell'Anno, "An industrial ecology of the US glass industry," *Resources Policy*, vol. 23, no. 3, pp. 109–124, 1997.
- [13] "United State Environmental Protection Agency report," 2012.
- [14] Z. Z. Ismail and E. A. Al-Hashmi, "Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete," *Waste management*, vol. 29, no. 2, pp. 655–659, 2009.
- [15] B. Taha and G. Nounu, "Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and

- cement replacement," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 5, pp. 713–720, 2008.
- [16] C. D. Johnston, "Waste glass as coarse aggregate for concrete," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 2, no. 5, pp. 344–350, 1974.
- [17] A. Tagnit-Hamou, N. Soliman, and A. Omran, "Green Ultra-High Performance Glass Concrete," 2016.
- [18] R. K. Dhir, T. D. Dyer, and M. C. Tang, "Alkali-silica reaction in concrete containing glass," *Materials and Structures*, vol. 42, no. 10, p. 1451, 2009.
- [19] C. S. Lam, C. S. Poon, and D. Chan, "Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass--ASR consideration," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 8, pp. 616–625, 2007.
- [20] I. B. Topcu and M. Canbaz, "Properties of concrete containing waste glass," *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274, 2004.
- [21] T.-C. Ling and C.-S. Poon, "Effects of particle size of treated CRT funnel glass on properties of cement mortar," *Materials and structures*, vol. 46, no. 1–2, pp. 25–34, 2013.
- [22] H. Du and K. H. Tan, "Concrete with recycled glass as fine aggregates," *ACI Materials Journal*, vol. 111, no. 1, pp. 47–57, 2014.
- [23] G. Lee, C. S. Poon, Y. L. Wong, and T. C. Ling, "Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry--mixed concrete blocks," *Construction and building materials*, vol. 38, pp. 638–643, 2013.
- [24] H. Maraghechi, G. Fischer, F. Rajabipour, and others, "The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 1, pp. 41–47, 2012.
- [25] N. A. Soliman, A. F. Omran, and A. Tagnit-Hamou, "Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete.," *ACI Materials Journal*, vol. 113, no. 3, 2016.
- [26] H.-Y. Wang and W.-L. Huang, "A study on the properties of fresh self-consolidating glass concrete (SCGC)," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 4, pp. 619–624, 2010.
- [27] T.-C. Ling, C.-S. Poon, and S.-C. Kou, "Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 8, pp. 848–854, 2011.
- [28] P. Turgut and E. S. Yahlizade, "Research into concrete blocks with waste glass," *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 203–209, 2009.
- [29] V. Vaitkevicius, E. Šerelis, and H. Hilbig, "The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 102–109, 2014.
- [30] C. H. Chen, R. Huang, J. K. Wu, and C. C. Yang, "Waste E-glass particles used in cementitious mixtures," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 3, pp. 449–456, 2006.
- [31] A. Shayan and A. Xu, "Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs," *Cement and concrete research*, vol. 36, no. 3, pp. 457–468, 2006.
- [32] J. Cassar and J. Camilleri, "Utilisation of imploded glass in structural concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 299–307, 2012.
- [33] P. Soroushian and others, "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 368–377, 2012.
- [34] A. Shayan and A. Xu, "Value-added utilisation of waste glass in concrete," *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 1, pp. 81–89, 2004.
- [35] N. Schwarz, H. Cam, and N. Neithalath, "Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 6, pp. 486–496, 2008.
- [36] A. Khmiri, B. Samet, and M. Chaabouni, "A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 680–686, 2012.
- [37] A. Khmiri, M. Chaabouni, and B. Samet, "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars," *Construction and building materials*, vol. 44, pp. 74–80, 2013.
- [38] Z. Xie and Y. Xi, "Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement,"

- Materials and Structures*, vol. 35, no. 8, pp. 510–515, 2002.
- [39] G. Chen et al., “Glass recycling in cement production—an innovative approach,” *Waste Management*, vol. 22, no. 7, pp. 747–753, 2002.
- [40] K. H. Tan and H. Du, “Use of waste glass as sand in mortar: Part I--Fresh, mechanical and durability properties,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117, 2013.
- [41] M. C. Limbachiya, “Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 1078–1083, 2009.
- [42] S. de Castro and J. de Brito, “Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 7–14, 2013.
- [43] M. Batayneh, I. Marie, and I. Asi, “Use of selected waste materials in concrete mixes,” *Waste management*, vol. 27, no. 12, pp. 1870–1876, 2007.
- [44] E. E. Ali and S. H. Al-Tersawy, “Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 785–791, 2012.
- [45] P. Penacho, J. de Brito, and M. R. Veiga, “Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 50, pp. 47–59, 2014.
- [46] T.-C. Ling and C.-S. Poon, “A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar,” *Journal of cleaner production*, vol. 29, pp. 46–52, 2012.
- [47] T.-C. Ling and C.-S. Poon, “Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes,” *Materials & Design*, vol. 32, no. 5, pp. 2675–2684, 2011.
- [48] T. M. Borhan, “Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre,” *Materials & Design*, vol. 42, pp. 265–271, 2012.
- [49] S. P. Gautam, V. Srivastava, and V. C. Agarwal, “Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete,” *J. Acad. Indus. Res.*, vol. 1, no. 6, pp. 320–322, 2012.
- [50] P. S. Bhandari and K. M. Tajne, “Use of waste glass in cement mortar,” *International Journal of Civil & Structural Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 704–711, 2013.
- [51] S. C. Bostanci, M. Limbachiya, and H. Kew, “Portland-composite and composite cement concretes made with coarse recycled and recycled glass sand aggregates: Engineering and durability properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 128, pp. 324–340, 2016.
- [52] J.-X. Lu and C. S. Poon, “Use of waste glass in alkali activated cement mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 399–407, 2018.
- [53] K. Bisht and P. V Ramana, “Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 177, pp. 116–124, 2018.
- [54] C.-C. Wang and H.-Y. Wang, “Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity,” *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 345–353, 2017.
- [55] R. Yu, D. V Van Onna, P. Spiesz, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, “Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass,” *Journal of cleaner production*, vol. 112, pp. 690–701, 2016.
- [56] O. D. Atoyebi and O. M. Sadiq, “Experimental data on flexural strength of reinforced concrete elements with waste glass particles as partial replacement for fine aggregate,” *ScienceDirect*, pp. 846–859, 2018.
- [57] L. S. Hooi, P. J. Min, T. Tim, T. Ueda, and H. Mueller, “Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete,” *Procedia Eng*, vol. 171, pp. 633–639, 2017.
- [58] A. Hajimohammadi, T. Ngo, and A. Kashani, “Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 193, pp. 593–603, 2018.
- [59] A. G. Khan and B. Khan, “Effect of partial replacement of cement by mixture of glass powder and silica fume upon concrete strength,” 2017.

تأثیر پودر سوپر جاذب در مقاومت بتن غلتکی



مریم حسینی

کارشناسی ارشد شیمی فیزیک
دبیر آموزش و پرورش استان فارس



مهدی ساحلی

کارشناس مهندسی عمران
اجرائی دانشکده فنی و حرفه ای شهید باهنر شیراز
دانشگاه فنی و حرفه ای فارس
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



مرتضی شریفی

عضو هیئت علمی بخش مهندسی عمران و معماری
دانشکده فنی و حرفه ای شهید باهنر شیراز
دانشگاه فنی و حرفه ای فارس
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

روسازیهای بتن غلتکی روشی نوین در راستای تکامل و توسعه روسازی ها می باشد. عملکرد روسازی بتن غلتکی در مکان هایی که تحت بارگذاری سنگین و همچنین سایش شدید باشد، مناسب است. روسازی بتن غلتکی با عمر بالا نسبت به نوع دیگر باعث می گردد هزینه ها در ساخت جاده و تعمیر و بازسازی جاده های فرسوده، کمتر باشد. این مخلوط ها توسط تجهیزات ساخت روسازی آسفالتی، پخش و سپس متراکم می شوند و سرانجام بعد از سخت شدن در اثر واکنش هیدراتاسیون سیمان به بتن غلتکی تبدیل می گردد. از همین رو عمل آوری هایی، که باعث تداوم هیدراتاسیون و در نهایت افزایش مقاومت بتن غلتکی گردد، بسیار حائز اهمیت می باشد. عمل آوری همچون پودر سوپر جاذب پلیمری که با آب ترکیب شده و آب را انقباض می کند، همانند مخزن های هیدروکسل طی مدت زمان ۸ الی ۱۲ روز آب انقباض شده را به بتن غلتکی تزریق کرده و باعث تدام عمل هیدراتاسیون می گردد. در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است که، تاثیر پودر سوپر جاذب پلیمری در بتن غلتکی، همراه با دو روش دیگر عمل آوری را به آزمایش در آید. که با افزایش مقاوم فشاری همراه گردیده است. میزان افزایش مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه در عمل آوری غوطه ور کردن در آب $44/1 \text{ kg/cm}^2$ و در عمل آوری اسپری کردن آب هر ۱۲ ساعت $94/3 \text{ kg/cm}^2$ بوده است. کلمات کلیدی: بتن غلتکی، افزایش مقاومت فشاری، روسازی، عمل آوری، پودر سوپر جاذب پلیمری

۱-مقدمه

ساخت روسازی بتن غلتکی روشی نوین در راستای توسعه و تکامل مصالحی نظیر خاک تثبیت شده با سیمان و یا اساس اصلاح شده با سیمان (CTB) می باشد. که مدت های مدیدی به عنوان زیراساس و اساس در طراحی و ساخت روسازی ها کاربرد داشته اند. این گونه کاربردهای اولیه بتن غلتکی، در بسیاری از کشورها قبل از جنگ جهانی اول نیز

صورت گرفته است. مهندسی کانادایی در ایالت بریتیش کلمبیا در سال ۱۹۷۰ به منظور ایجاد لایه های اساس با کیفیت بالاتر کاربرد سنگدانه با مقدار بالاتری از سیمان را آغاز کردند. گام بعدی در نظر گرفتن روسازی بتن غلتکی به عنوان روسازی کامل و بدون نیاز به لایه روکش بود. اولین کاربرد روسازی بتن غلتکی بدین شکل در ساخت محوطه ای برای کارخانجات چوب و الوار با بارگذاری سنگین در

ونکوور در سال ۱۹۷۰ بود. عملکرد روسازی بتن غلتکی در این محوطه که تحت بارگذار ی سنگین و همچنین سایش شدید بود بسیار موفقیت آمیز بود. به نحوی که از آن زمان روسازی بتن غلتکی برای ساخت روسازی محوطه های صنعتی کاربرد وسیعی در کانادا و دیگر کشورهای جهان داشته است.

انواع روسازی های بتنی به چهار دسته: ۱- JPCP روسازی بتنی غیر مسلح درز دار ۲- CRCP روسازی بتنی مسلح پیوسته ۳- JRCP روسازی بتنی مسلح درزدار ۴- PCP روسازی بتنی پیش تنیده تقسیم می شوند. [۱]

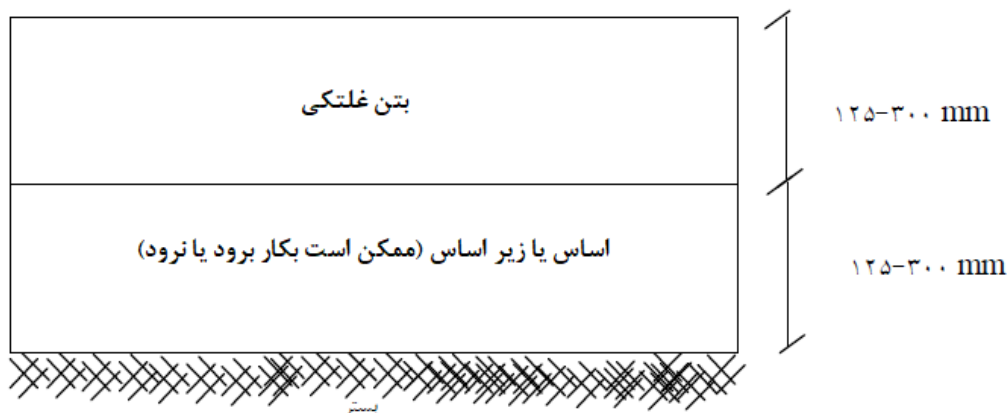
بتن غلتکی ویژه روسازی راه دارای مقدار سیمان زیاد ، مقاومت فشاری معمولاً بالاتر از ۳۰ مگا پاسگال و طرح اختلاط با اندازه و دانه بندی مصالح کنترل شده در یک محدوده مشخص می باشد. [۲] در روسازی راه، بتن غلتکی می تواند به عنوان رویه اصلی برای تامین استقامت باربری سازه روسازی مورد استفاده قرار گیرد. طرح روسازی بتن غلتکی مشابه پروسه طراحی روسازی بتنی درزدار غیر مسلح با درزهای انقباضی داول می باشد . اختلاف اصلی بین بتن غلتکی و بتن معمولی در ارتباط با روش ساخت روسازی ، فواصل درزها و ظاهر رویه می باشد. [۳]

طبق تعریف بتن غلتکی روسازی راه عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشکی از سنگ دانه ها (با اندازه حد اکثر ۱۹ میلیمتر) مواد سیمانی و آب که توسط دستگاههای متداول روسازی آسفالتی (فینیشر) پخش و پس از آن توسط غلتک و بیره ای کوبیده و متراکم می گردد و سرانجام بعد از سخت شدن در اثر واکنش هیدراتاسیون سیمان به بتن تبدیل می گردد. [۲ و ۴] مواد تشکیل دهنده بتن غلتکی در داخل مخلوط کن به یک مخلوط همگن تبدیل می شود و دارای کارآیی و ظاهر مشابه با مخلوط شن نمدار و یا بتن با اسلامپ صفر می باشد.

این مخلوط ها توسط تجهیزات ساخت روسازی آسفالتی در لایه هایی که ضخامت حداکثر آنها در وضعیت متراکم شده از ۲۵ سانتی متر تجاوز نمی کند پخش و سپس متراکم می شوند . لایه ها با غلتکهای فولادی و بیره ای متراکم می گردند . در مواردی جهت دستیابی به کیفیت بهتر سطح از غلتک های چرخ لاستیکی برای تراکم نهایی لایه ها استفاده می شود . پس از تراکم ، عملیات عمل آوری و مرطوب نگه داشتن سطح بتن آغاز می گردد تا امکان دستیابی به روسازی با سطح سخت و با دوام فراهم آید. معمولاً از روسازی بتن غلتکی به عنوان سطح نهایی سواره رو استفاده می شود.

برای طراحی روسازی بتنی بجای تئوری لایه ها که در طراحی روسازی انعطاف پذیر(آسفالتی) استفاده میشود از تئوری صفحات استفاده می گردد . تئوری صفحه در واقع همان حالت ساده شده تئوری لایه ها است که فرض می کند دال بتنی یک صفحه تقریباً ضخیم است که قبل از خمش وارده به آن مسطح بوده و پس از خمش نیز به حالت مسطح باقی خواهد ماند. اگر چنانچه بارگذاری ناشی از بارهای چرخ فقط در قسمت میانی یک دال اعمال گردد هم تئوری لایه ها و هم تئوری صفحه میتواند مورد استفاده قرار گیرد و بایستی هر دو منجر به مقادیر مشابهی کرنش یا تنش خمشی گردند . اگر چنانچه بار چرخ نزدیک کناره های دال ۰/۶ متر (۲ فوت) از لبه دال وارد شود، تنها تئوری صفحه می تواند برای روسازی بتنی مورد استفاده قرار گیرد. و در فاصله های کمتر از ۰/۶ متر زیر تئوری لایه ها تنها برای روسازی انعطاف پذیر مورد استفاده قرار گرفته و در روسازی بتنی قابل استفاده نمی باشد.

شکل ۱، یک روسازی بتنی را در حالت کلی نشان می دهد، همان طور که در شکل ۱ دیده می شود در زیر دال بتنی اساس و یا زیر اساس ممکن است قرار گیرد و یا اینکه دال بتنی مستقیماً بر روی سابگرید قرار داده شود.



شکل ۱- دتایل اجزای روسازی بتنی

عمل آوری از طریق منابع آب درونی نیز می تواند انجام شود. [۵] این نوع از عمل آوری که به عمل آوری درونی معروف است در دهه ۹۰ میلادی رشد چشمگیری داشته است. [۶] عمل آوری درونی با پودر سوپر جاذب پلیمری یکی از کم هزینه و با سهولت ترین عمل آوری های بتن می باشد. عمل آوری درونی می تواند در گرمای تابستان و سرمای زمستان به کمک روش های دیگر عمل آوری بیاید، بلکه با روش عمل آوری درونی که دارد، می تواند کمکی باشد برای افزایش مقاومت فشاری و دوام. [۷]

یکی از راه های عمل آوری درونی استفاده از پودر سوپر جاذب پلیمری می باشد. در ویژگی اصلی پودر عمل آوری درونی توانایی آن در نگهداری آب مورد نیاز بتن، برای عمل آوری است. [۸] سوپر جاذب با توجه به توانایی هایی که دارند در موارد متنوع و گسترده ایی مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله صنایع سلولزی بهداشتی، کشاورزی، حفاری، تولید بتن، تولید کابل های رطوبتی و... کاربرد دارد. به طور کلی سوپر جاذب ماده ای خشک و به طور معمول با دانه بندی به شکل شکر یا نمک می باشد که توانایی جذب آب و محلول به میزان چندین برابر وزن خود را دارد و این پودر به هیچ عنوان سمی و یا شیمیایی نمی باشد که به انسان و بتن آسیب بزند.

این عمل آوری بدین صورت می باشد که مقداری از آب بتن را به همراه پودر سوپر جاذب پلیمری به ژل سوپر

می توان مزایای استفاده از روسازی بتنی به چند مورد : ۱- رویه های بتنی در نواحی با مقاومت بستر کم و ترافیک سنگین نسبت به روسازی آسفالتی ارجحیت دارد. ۲- هزینه های تعمیر و نگهداری روسازی بتنی در مقایسه با آسفالتی کمتر است. ۳- عمر مفید رویه های بتنی بیشتر از روسازی های آسفالتی است (۴۰ تا ۵۰ سال درمقابل ۱۵ الی ۲۰ سال) ۴- بدلیل فراهم ساختن دید بیشتر در شب برای استفاده کنندگان، روسازی بتنی از نظر ایمنی نسبت به آسفالتی ارجح تر است. ۵- ضخامت روسازی بتنی در مقایسه با روسازی آسفالتی کمتر است و در نتیجه در نواحی که محدودیت ضخامت وجود دارد، ارجحیت داشته ۶- در عین حال در مصرف مصالح نیز صرفه جویی می گردد، اشاره کرد.

حال این نمونه رو سازی ها برای عملکرد بهتر به یک عمل آوری خوب نیازمند هستند. عمل آوری هایی همچون اسپری کردن آب و یا گونی کشیدن امروزه به تنهایی روش موثر برای عمل آوری بتن نمی باشد، زیرا در فصل تابستان با گرمای هوا، خشک شدگی سریع پس از اسپری کردن آب رخ می دهد و در فصل زمستان با سرمای هوا، آب سردی که اسپری شده باعث کاهش حرارت بتن و در نتیجه متوقف شدن هیدراتاسیون در سطوح قطعات می شود. برای عمل آوری بتن، یکی از روشهای بسیار موثر عمل آوری مرطوب در مجاورت آب است. علاوه بر این،

و هزینه هر یک کیلوگرم آن ۴۰۰/۰۰۰ ریال می باشد. با استفاده از پودر سوپر جاذب پلیمری در بتن که همانند مخزن های هیدروکسیل آب عمل کرده و عمل آوری درونی در بتن غلتکی را طی مدت زمان ۸ الی ۱۲ روز به صورت پیوسته انجام خواهد گرفت. هر یک گرم از پودر سوپر جاذب پلیمری قادر است ۸۰ میلی گرم از آب را منقبض کند. میزان مصرف پودر سوپر جاذب پلیمری در این طرح اختلاط ۳ گرم بوده است.



شکل ۲ - پودر سوپر جاذب پلیمری

۲-۲- سیمان

سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط، سیمان تیپ II شرکت فارس نو (فیروزآباد) با نرمی 2950 gr/cm^2 می باشد. مشخصات شیمی سیمان در جدول ۱ موجود می باشد.

جدول ۱ - آنالیز شیمیایی سیمان تیپ II

عناصر	میزان %	عناصر	میزان %
SiO ₂	21.46%	K ₂ O	0.78%
Al ₂ O ₃	5.14%	Na ₂ O	0.13%
CaO	64.38%	L.O.I	0.91%
MgO	1.38%	Cl	0%
So ₃	1.86%	Fe ₂ O ₃	3.96%

آزمایش وزن مخصوص سیمان باید مطابق استاندارد ASTM C188-89 صورت پذیرد. طبق استاندارد ذکر شده وزن مخصوص سیمان تیپ II شرکت فارس نو (فیروزآباد) در جدول ۲ قرار گرفته است. [۹]

جاذب پلیمری تبدیل کرده و به بتن اضافه می کنیم. این ژل های پلیمری، مانند مخازن ذخیره ای کوچک آب هستند که به مرور زمان ژل سوپر جاذب پلیمری آب خود را جهت هیدراتاسیون به سیمان می دهد. [۷]

در این پژوهش تاثیر استفاده از پودر سوپر جاذب پلیمری که باعث عمل آوری درونی بتن می شوند را بر ساخت بتن غلتکی بررسی کرده و به مطالعه مقاومت فشاری آن ها (که با فرایند عمل آوری درونی و بدون عمل آوری درونی در دو حالت ۱- نمونه بیرون آب ۲- نمونه های که هر ۱۲ ساعت روی آن ها آب اسپری شود) پرداخته می شود.

۲- مصالح مصرفی

۲-۱- پودر سوپر جاذب پلیمری

پودر سوپر جاذب پلیمری (Super Absorbent Polymer) که به آن هیدروژل هم می گویند، یک ماده آلی بوده است که با خاصیت که دارد، آب را انقباض کرده و به گذشت زمان آب را به حالت اولیه خود باز می گرداند. مطابق با آخرین فن آوری ابر جاذب ها توسعه یافته است که توانایی جذب آب و مواد محلول به میزان چند ده برابر وزن خود را دارد. پیوند هیدروژنی که بین گروه های عاملی هیدروکسیل ایجاد می شود باعث افت فشار بخار آب و در نتیجه کاهش تبخیر آب خواهند شد که حفاظت آبی را در بتن ارتقاء داده و باعث بالا رفتن درجه هیدراتاسیون بتن می شوند. دلیل استفاده از این پودر در بتن، بهبود بخشیدن به عمل آوری بتن می باشد. به نحوی که مقدار مشخصی از آب بتن را به وسیله این پودر انقباض کرده و به بتن اضافه می کنیم و با گذشت زمان عمل آوری درونی بتن را انجام می دهد و هیدراتاسیون را بهبود می بخشد. با کم کردن آب و انقباض کردن آن، کارایی بتن و شکل پذیری آن کاهش پیدا می کند. که این مشکل را با افزایش مواد افزودنی فوق روان کننده (تا حد مجاز مصرف طبق نظر کارخانه تولیدکننده) حل می کنیم. پودر سوپر جاذب پلیمری در داخل کشور جمهوری اسلامی ایران تولید دارد

جدول ۲ - مشخصات وزن مخصوص سیمان

مصلح	وزن مخصوص kg/cm^3
سیمان	۳/۱۵

۳-۲-آب

آب مورد استفاده در این پژوهش آب لوله کشی شهر شیراز بوده که طبق استاندارد ASTM D1067 ، PH آن ۷ می باشد. [۱۰]

۴-۲-فوق روان کننده

در این پژوهش از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر (طبق استاندارد ملی ایران شماره ۴-۸۱۱۷ و شماره ۱-۲۹۳۰) که رنگی شفاف مایل به قهوه ای دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. [۱۱ و ۱۲]

۵-۲-سنگدانه

کلیه سنگدانه های مصرفی از جنس سیلیس می باشند و فاقد هرگونه سنگدانه سوزنی یا پولکی شکل هستند. برای جلوگیری از نفوذ خاک در بتن، تمامی سنگدانه های مصرفی در آزمایشگاه به خوبی شسته شده اند و عاری از هرگونه گل و لای بوده است. تمامی الزامات استفاده از سنگدانه طبق استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ (که برگرفته از استاندارد ASTM C 33/C 33M می باشد) رعایت شده است. [۱۳]

۱-۵-۲-SSD کردن سنگدانه ها

SSD بودن سنگدانه ها در بتن غلتکی بسیار حائز اهمیت می باشد زیرا نسبت آب به سیمان کم می باشد و آب بتن نباید صرف حفره های خالی و خشک سنگدانه ها شود به همین دلیل کلیه سنگدانه های مصرفی پس از شستشو بمدت ۲۴ ساعت درون آب غوطه ور شده و سپس بعد از گذشت ۲۴ ساعت از آب خارج شده و آن ها را درون ظروفی که در برابر حرارت مقاوم باشند به قطر ۲ سانتی متر قرار

گرفتند. سپس در دستگاه خشک کن (OVEN) در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد به حالت اشباع با سطحی خشک (SSD) درآمده اند.

۲-۵-۲-دانه بندی سنگدانه

دانه بندی مصالح یکی از مهم ترین مراحل ساخت بتن می باشد. دانه بندی مصالح بر اساس توصیه های نشریه ۳۵۴ "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور" وزارت راه و ترابری صورت گرفته و آزمایش شده است. برای دانه بندی باید از الک های استاندارد ASTM E11 استفاده کرد. الک های مورد استفاده "۱"، "۳/۴"، "۱/۲"، "۴"، "۸"، "۱۶"، "۳۰"، "۵۰"، "۱۰۰"، "۲۰۰" به ترتیب روی هم گذاشته و Pan را زیر آن ها قرار می دهیم. اولین الک را براساس بزرگ ترین بعد سنگدانه انتخاب می کنیم. برای شناخت از دانه بندی مصالح دپو شده، مقدار ۱ کیلوگرم از مصالح را بر می داریم و به روی الک ها ریخته و به مدت زمان ۲۰ دقیقه به وسیله شیکر، الک می کنیم.

سپس میزان مانده هر الک را وزن و در جدول یادداشت می کنیم. با فرمول جزء تقسیم به کل و سپس با ۱۰۰ ضرب می کنیم، درصد مانده روی الک را بدست می آوریم. باتوجه به این که روی اولین الک میزان مانده صفر می باشد، در نتیجه درصد مانده صفر و درصد رد شده صد در صد می باشد. درصد مانده الک دوم را بدست آورده و از درصد رد شده الک اول کم کرده و درصد مانده الک سوم را به ترتیب از الک دوم الی آخر حساب کرده تا به Pan برسیم. جدول ۳، دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده را نشان می دهد.

جدول ۳ - مشخصات دانه بندی مصالح سنگی

شماره الک	طول ضلع الک بر حسب میلی متر	وزن مصالح باقیمانده بر روی الک بر حسب گرم	درصد مصالح باقی مانده روی الک	درصد مصالح رد شده از الک
۱"	۲۵/۴	۰	۰	۱۰۰
۳/۴"	۱۹	۴۵	۴/۵	۹۵/۵
۱/۲"	۱۲/۵	۹۵	۹/۵	۸۶
۴	۴/۷۵	۱۳۰	۱۳	۷۳
۸	۲/۳۶	۲۰۰	۲۰	۵۳
۱۶	۱/۱۸	۱۵۰	۱۵	۳۸
۳۰	۰/۶	۱۲۰	۱۲	۲۶
۵۰	۰/۳	۱۰۰	۱۰	۱۶
۱۰۰	۰/۱۵	۷۵	۷/۵	۸/۵
۲۰۰	۰/۰۷۵	۵۰	۵	۳/۵
PAN	—	۳۵	۳/۵	۰

۳-۵-۲- مدول نرمی

مدول نرمی ماسه به همان روش دانه بندی مصالح سنگی انجام می شود. تنها فرق آن، استفاده نکردن از الک های ۱"، ۳/۴" ، ۱/۲" می باشد. جدول ۴ ، مدول نرمی ماسه استفاده شده را نشان می دهد.

جدول ۴ - مدول نرمی ماسه

نمونه الک	وزن مانده روی الک		درصد های مانده
	یک الک	همه الک ها	
۴	۲۱۰	۲۱۰	۲۴/۳
۸	۱۷۴/۵	۳۸۴/۵	۴۴/۵
۱۶	۱۵۶/۵	۵۴۱	۶۲/۶
۳۰	۱۲۴	۶۶۵	۷۶/۹
۵۰	۱۱۸/۵	۷۸۳/۵	۹۰/۶
۱۰۰	۸۱	—	—
PAN	—	—	—
وزن الک	۸۶۴/۵	—	۲۹۸/۹
مدول نرمی	۲۹۸/۹ ÷ ۱۰۰ = ۲/۹۸		

۴-۵-۲- وزن مخصوص سنگدانه

هیچ وجه این آزمایش برای سنجش کیفیت سنگدانه ها به کار نمی رود. با استفاده از جدول ۵ نسبت به بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه ها حداقل وزن نمونه را به دست می آوریم. نمونه برداری از مصالح باید به گونه ای باشد که از تمام

وزن مخصوص انبوهی را بر اساس وزن سنگدانه های اشیاع شده به مدت ۲۴ ساعت در آب با سطح خشک (SSD) تعیین می شود و برای طرح اختلاط بتن کاربرد دارد به

۳- روش کار

آزمایشگاه مورد استفاده برای این پژوهش در شهرستان شیراز می باشد. در طرح اختلاط بتن غلتکی مقاومت فشاری در نظر گرفته شده 30.0 kg/cm^2 می باشد. در ابتدا دو روش عمل آوری بتن وجود دارد، که یک روش بیرون از آب که هر ۱۲ ساعت یک بار به روی بتن ها آب پاشیده و روش دیگر غوطه ور کردن در آب می باشد. در هر روش دو نمونه بتن وجود دارد که یک نمونه آن با پودر سوپر جاذب پلیمری و یک نمونه دیگر بدون پودر سوپر جاذب پلیمری می باشد. همه این نمونه ها در یک روز ساخته شده است و دمای آزمایشگاه هنگام ساخت بتن ۲۹ درجه سانتی گراد بوده است. ابتدا سنگدانه ها را که در حالت SSD می باشند درون میکسر ریخته و هنگامی که به خوبی شن و ماسه ها باهم مخلوط شدند سیمان را به آن ها اضافه می کنیم. بعد مخلوط شدن مصالح خشک ۸۰٪ آب را به مخلوط اضافه کرده و بعد از گذشت ۲۵ دقیقه از مخلوط شدن آب و سیمان و سنگدانه ها ۲۰٪ مابقی آب را به مخلوط اضافه می کنیم.

*۱۵٪ از سنگدانه ریز (الک ۳۰ و ۱۶) کم شده و به جای آن پودر سنگ جهت پرکننده گی بهتر اضافه شده است.

*در نمونه های که با پودر سوپر جاذب پلیمری می باشند میزان پودر مصرفی را با ۲۰٪ مابقی آب مخلوط کرده و به بتن اضافه می کنیم.

قبل از آماده شده بتن، قالب ها را آماده کرده و بتن ها را به داخل قالب ریخته و پس از گذشت ۲۴ ساعت از ساخت بتن قالب آزمونه ها را باز کرده و آزمونه هایی که طبق برنامه در آب باشند را درون آب و آزمونه های دیگر هم بیرون از آب قرار داده شده است. بعد از گذشت ۷ و ۲۸ روز از ساخت بتن نمونه ها را برای ارزیابی مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار داده ایم. آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM C39-86 خواهد بود [۱۴] که مقاومت های فشاری آن ها در شکل ۳ و ۴ موجود می باشد.

مصالح دپو شده نمونه برداری شود. طبقه برداشت نمونه الزماً باید به وسیله لوله ای با طول ۱۸۳ سانتی متر و قطر ۳ سانتی متر و سر لوله برش ۴۵ درجه شده باشد، برداشت می شود.

جدول ۵ - میزان نمونه برداری از سنگدانه

حداقل وزن نمونه Kg	حداکثر اندازه سنگ دانه Mm
۲	۱۲/۵ یا کمتر
۳	۱۹
۴	۲۵
۵	۳۷/۵
۸	۵۰

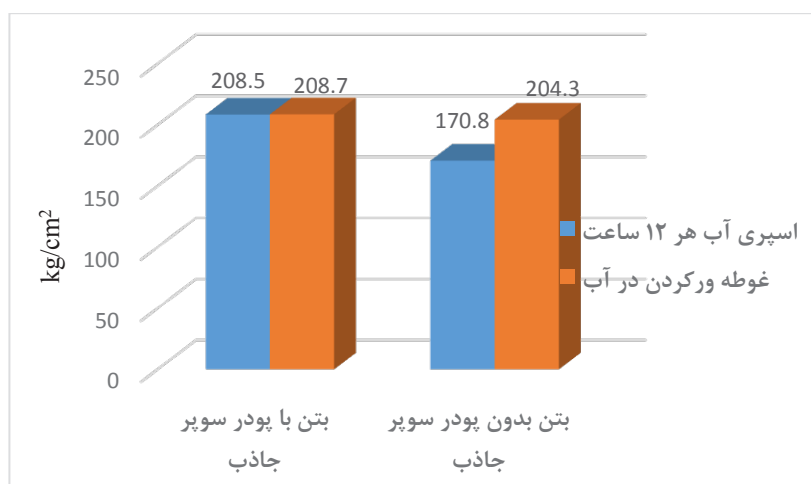
با توجه به بزرگترین اندازه سنگدانه ۲۵ میلی متر می باشد، حداقل وزن نمونه ۴ کیلوگرم انتخاب می کنیم. روش آزمایش برای شن و ماسه جدا گانه می باشد.

ابتدا یک قالب $15 \times 15 \times 15$ سانتی متر با حجم 3375 cm^3 را از مصالح مورد نظر پر کرده و آن را وزن، و از وزن قالب کم می کنیم. وزن خالص مصالح را تقسیم بر حجم قالب کرده و وزن مخصوص ظاهری مصالح به دست می آوریم. سپس قالب را خالی کرده و یک سوم حجم آن را با مصالح پر می کنیم و به وسیله میله ۳۵ ضربه زده و آن را متراکم می کنیم. در ادامه یک سوم دیگر قالب را مصالح می ریزیم و دوباره ۳۵ ضربه می زنیم و در آخر مابقی قالب را پر می کنیم و ضربه میزنیم و قالب را پر می کنیم.

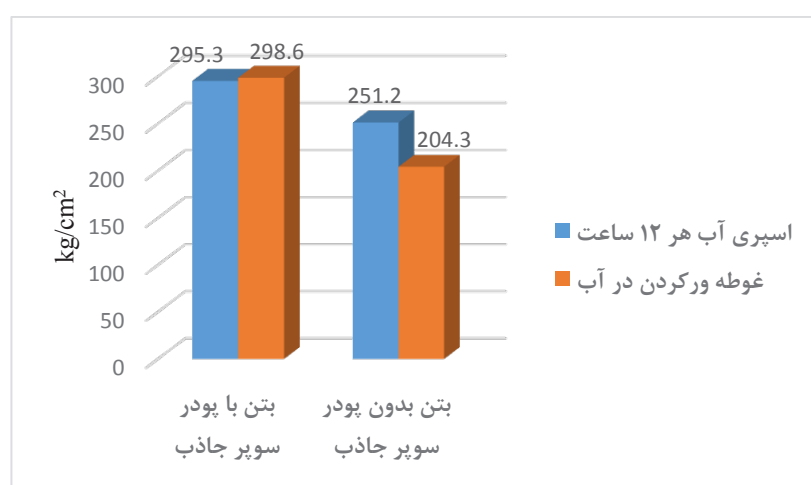
سپس آن را وزن و از وزن قالب کم کرده و حجم ظرف تقسیم می کنیم و به وزن مخصوص میله خورده یا متراکم می ریزیم. با این روش شن و ماسه را جداگانه مورد آزمایش قرار داده و به وزن مخصوص شان می رسیم. جدول ۶ وزن مخصوص مصالح سنگی مورد استفاده را نشان می دهد.

جدول ۶ - مشخصات وزن مخصوص سنگدانه ها

مصالح	وزن مخصوص ظاهری kg/m^3	وزن مخصوص میله خورده kg/m^3
شن	۱۶۵۰	۱۷۴۰
ماسه	۱۶۴۰	۱۷۹۰



شکل ۳ - آنالیز مقاومت فشاری نمونه ها ۷ روزه



شکل ۴ - آنالیز مقاومت فشاری نمونه ها ۲۸ روزه

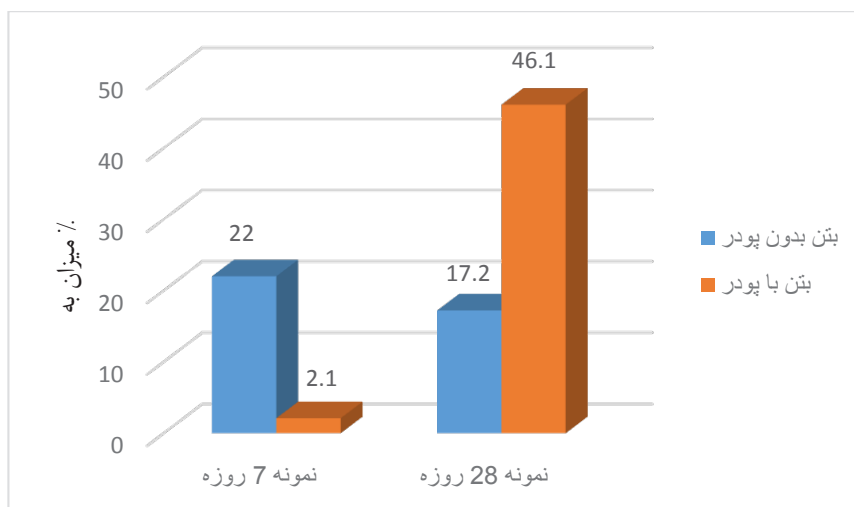
متوقف شده است. همچنین در نمونه های بدون پودر سوپر جاذب با عمل آوری غوطه ور کردن، در ۲۴ ساعت اولیه ساخت بتن هیچ منبع آبی برای جلوگیری از تبخیر یا جایگزین شدن آب بتن نبوده است و همچنان هیدراته شدن به خوبی صورت نمی پذیرفته و باعث عدم رشد مقاومت فشاری آن ها شده است.

می توان نتیجه گیری و پیشنهاد کرد در شرایطی که امکان عمل آوری به صورت کامل میسر نمی باشد با استفاده از پودر سوپر جاذب پلیمری می توان از توقف هیدراته شدن سیمان که نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری است، جلوگیری کرد.

درصد های افزایش مقاومت فشاری نمونه ها در جدول ۵ قرار گرفته است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مشخص گردید به دلیل استفاده از پودر سوپر جاذب پلیمری که با ایجاد پیوند هیدروکسیل باعث جلوگیری از کم شدن نسبت آب به سیمان شده و همچنین به گذشت زمان آب خود را جهت تکمیل فرآیند هیدراته شدن به سیمان داده است، شاهد افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتنی که فاقد سوپر جاذب پلیمری بوده است، شده ایم. در نمونه های بتن بدون پودر سوپر جاذب با عمل آوری اسپری هر ۱۲ ساعت، میزان آب نمونه ها برای عمل هیدراته شدن تحت تاثیر عوامل جوی کم شده و هیدراته شدن به خوبی صورت نمی پذیرفته یا بعد از گذشت مدتی کوتاه (۷ الی ۱۰ روز) هیدراته شدن سیمان



شکل ۵- آنالیز درصد رشد مقاومت فشاری نمونه ها

۵-قردانی

در اینجا لازم است از همکاری خوب مسئولین دانشگاه فنی و حرفه ای استان فارس خصوصا بخش عمران دانشکده فنی و حرفه ای شهید باهنر شیراز که اجازه کار در آزمایشگاه بتن را فراهم کرده و ضمن تهیه مصالح مورد نیاز مساعدت کردند تا گامی در جهت توسعه دانش در کشور برداشته شود.

۶-مراجع

- [۱] نشریه ۳۵۴ "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور" وزارت راه و ترابری
- [2] ACI 325.10 (2000). "State of art Report on Roller Compacted Concrete Pavements," American concrete Institute report ACI 325.10-95,.
- [3] Hodgkinson J.R, (1991). "Design and Construction of Roller Compacted concrete (RCC) Pavemen" t ,Cement and Concrete Association of Australia.
- [4] Naik, T.R. etal,(2001) "strength and durability of roller compacted HVFA concrete pavements " Practice periodical on structural design and construction, November, pp 154-165.
- [۵] رحیمی، و، میثاقی، ق،، کیهانی، ع. (۱۳۸۹). "بتن مقاومت بالا با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب"، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، همایش های بین المللی رازی
- [6] Kovler, K and Jensen, O (2005) " Novel Techniques for Concrete Curing ". Concrete International New York.
- [۷] شریفی، م، حبیب پور، ن، ساحلی، م. (۱۳۹۹). "تاثیر استفاده از پودر سوپر جاذب پلیمری در عمل آوری و مقاومت بتن معمولی". سومین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی
- [۸] احمدی، ج، پناهی، ع، عزیز، ح. (۱۳۹۳). "عمل آوری داخلی با استفاده از سبکدانه ها و تاثیر آن بر ویژگی های مکانیکی بتن با مقاومت بالا"، مجله علمی پژوهشی، مهندسی عمران مدرس دوره هفدهم، شماره ۳
- [9] ASTM C188-89 , Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
- [10] ASTM D1067 , Standard Test Methods For Acidity or Alkalinity of Water.
- [۱۱] استاندارد ملی ایران شماره ۴-۸۱۱۷
- [۱۲] استاندارد ملی ایران شماره ۱-۲۹۳۰
- [۱۳] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ تجدید نظر ۱۳۹۴.
- [14] ASTM C39-86 , Standard Test Methods For Compressive Strength of Concrete Specimens.

بررسی موردی تاثیر تغییرات نرمی سیمان در افت اسلامپ بتن تولیدی در کارخانجات بتن آماده



زیور نیکفال

رئیس آزمایشگاه فیزیک مجتمع صنعتی سیمان تهران



بابک احمدی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



علی اکبر کفاش بازاری

رئیس مرکز تحقیق و توسعه سیمان تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

افت اسلامپ همواره یکی از مشکلات و معضلات صنعت بتن آماده است. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از منابع متعدد، عوامل موثر در افت اسلامپ شناسایی و راهکارها معرفی گردد. از مهمترین عوامل می توان به دمای بتن، نوع سنگدانه های مصرفی، عیار سیمان در بتن، مشخصات فنی سیمان و زمان حمل بتن اشاره نمود. سپس با استفاده از چهار نمونه سیمان پرتلند نوع ۲ با بلین های ۲۸۰۰، ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی متر مربع بر گرم، مخلوط های بتنی با اسلامپ ۱۲ سانتی متر تهیه و قالب گیری گردید. روند افت اسلامپ این مخلوط های بتنی در آزمایشگاه طی یک ساعت اندازه گیری شد. سپس آب به آنها اضافه گردید تا اسلامپ مجدداً به ۱۲ سانتی متر برسد و قالب گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش شاخص بلین، روند افت اسلامپ کمی تسریع می شود. همچنین افت مقاومت در مخلوط هایی که دچار افت اسلامپ شده بودند و با افزودن آب به اسلامپ اولیه (۱۲ سانتی متر) رسانده شده بود، بطور میانگین ۱۴٪ تعیین شد. این تحقیق برای کارخانه های تولید بتن آماده که اسلامپ محور هستند، انجام شد. کلمات کلیدی: افت اسلامپ، بتن، سیمان.

مقدمه

بتن تازه روانی (اسلامپ) خود را طی زمان از دست می دهد. این پدیده "افت اسلامپ"^۱ نامیده می شود. در این تحقیق سعی شده است که ضمن بررسی منابع مختلف و متعدد، علل افت اسلامپ بتن بیان شود. با توجه به اینکه

پارامتر سیمان اثرات واضحی در این پدیده دارد، تلاش شد تا تمرکز بیشتری بر روی آن شود. یکی از بارزترین شاخصه های سیمان که تاثیر نسبتاً زیادی در پدیده افت اسلامپ و مشخصات بتن دارد، نرمی آن است که غالباً با شاخص بلین شناخته می شود. بنابراین در این مقاله با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، اثر تغییرات نرمی سیمان بر روند افت اسلامپ بررسی می شود.

¹ slump loss

مطالعات قبلی و عوامل موثر در افت اسلامپ

بطور کلی عوامل موثر در افت اسلامپ را می‌توان پنج دسته نمود:

۱- عوامل محیطی؛

۲- سیمان؛

۳- افزودنی‌ها؛

۴- طرح مخلوط؛

۵- عوامل اجرایی.

[۱-۲]. در ادامه به توضیح عوامل مذکور پرداخته می‌شود.

۱-۲- عوامل محیطی:

عوامل محیطی شامل دما و رطوبت نسبی تاثیر بسیار زیادی در افت اسلامپ دارد. دمای بالای بتن باعث تشدید افت اسلامپ می‌گردد. اثر تسریع‌کنندگی دما بر روی سرعت هیدراتاسیون سیمان پرتلند و افت اسلامپ بتن بسیار چشمگیر است. بطور مثال می‌توان نشان داد که با افزایش دما از ۲۰ به ۴۰ درجه سلسیوس، سرعت هیدراتاسیون با ضریب ۲/۴۱ برابر زیاد می‌شود. جهت غلبه بر این سفت‌شدگی تسریع شده و افت اسلامپ بتن، آب بیشتری باید به اختلاط افزوده شود که عملاً منجر به اختلاط مجدد بتن در محل کارگاه پروژه می‌شود و میزان آب نهایی بیشتر از نسبت آب به سیمان اولیه خواهد شد و در نتیجه به طرز نامطلوبی بر خصوصیات بتن و اسلامپ بتن اثر می‌گذارد. از سوی دیگر، بالا بردن میزان سیمان موجود برای حصول نسبت آب به سیمان مورد نیاز به دو علت نامطلوب است: ۱- هزینه بالای سیمان، ۲- جمع‌شدگی و مستعد شدن بتن به ترک‌خوردگی. مطالعات نشان داده‌اند که روش‌های سنتی افزایش سیمان موجود برای اطمینان از فاکتورهای مقاومت بتن و دوام بتن، مشکلات دیگری را ایجاد می‌نماید. بنابراین در شرایط آب و هوایی بسیار گرم چالشی برای دستیابی به کیفیت مدنظر و بهره‌وری مورد نیاز شرایط اجرایی را ایجاد می‌کند. بنابراین، افزودنی‌های کاهنده آب و کندگیرکننده بتن باید در نظر گرفته شوند [۳].

راماگریشنن و پرومالسوامی (۱۹۸۳) تأثیر نامطلوب آب و هوای گرم بر افت اسلامپ بتن و تعیین زمان مناسب برای بتن‌های حاوی فوق‌روان‌کننده را مطالعه کردند. نتایج این تحقیق آزمایشگاهی افت اسلامپ، زمان گیرش و کارایی در دمای بتن کم و زیاد برای بتن‌های فوق‌خمیری ارائه شد. در هنگام افزایش ۱۶ درجه فارنهایتی، دمای اولیه بتن، زمان گیرش اولیه و نهایی کاهش قابل توجهی داشتند [۴].

۲-۲- سیمان:

مشخصات سیمان مانند نوع (تیپ)، نرمی (بلین) و اجزای تشکیل‌دهنده آن نیز در افت اسلامپ موثر است. افت اسلامپ به مقدار (عیار)، نوع و خواص فیزیکی سیمان (زمان گیرش، آب‌خواهی و غیره) نیز وابسته است. شیمی سیمان نیز می‌تواند در افت اسلامپ تأثیر بگذارد. در تولید سیمان، سنگ گچ با کلینکر سائیده می‌شود. گچ منبع سولفات است که خیلی سریع با آلومینات تری کلسیم (C_3A) واکنش نشان می‌دهد تا گیرش سیمان به تعویق بیفتد. C_3A در صورت فقدان سولفات، در عرض چند دقیقه واکنش می‌دهد. سولفات (گچ) سیمان می‌تواند به چندین شکل باشد: آب‌دار کامل (ژپس)، نیمه آب‌دار (همی‌هیدرات) یا انیدریت (فاقد آب). مقادیر زیادی از همی‌هیدرات معمولاً باعث ایجاد گیرش کاذب می‌شود. برای اندازه‌گیری گیرش کاذب از استاندارد ASTM C359 [۵] می‌توان استفاده کرد [۶].

بونن و سارکر^۲ (۱۹۹۵) اثر هیدراتاسیون C_3S و تاخیر در گیرش بتن را تشریح نمودند که در روند افت اسلامپ موثر می‌باشد.

در مطالعه جیانگ و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از آزمایش مینی اسلامپ [۷]، سه سیمان پرتلند کم‌قلیا از نظر سیالیت در خمیر سیمان با دارای نسبت آب به سیمان کم (با ۰,۳۰ تا ۰,۳۵) ناسازگاری با یک فوق‌روان‌کننده PNS دیده شده است. به نظر می‌رسد افزودن مقدار کمی سولفات سدیم یک روش عملی برای حل مشکل افت

² Boaen and Sarker (1995)

اسلامپ این خمیرهای سیمانی و بتن‌های فوق روان است. افزودن سولفات سدیم بین ۰/۸-۰/۲٪ (یا Na_2O معادل ۰/۳۵-۰/۱۰) باعث کاهش چشمگیر سرعت افت اسلامپ می‌شود و پس از اختلاط مخلوط‌های بتنی فوق روان، میزان افت اسلامپ را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و بیش از ۹۰ دقیقه مقدار اسلامپ بالا را حفظ می‌کند [۸].

واضح است که نرمی سیمان بر رئولوژی و مقاومت بتن اثر واضحی دارد [۹-۱۰]. مردانی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر نرمی سیمان بر روی بتن تازه، خواص رئولوژیکی و همچنین مقاومت فشاری را مطالعه نمودند. آنها بلین سیمان را در محدوده ۲۸۰۰-۴۵۰۰ سانتی متر مکعب در گرم پایش کردند. طبق نتایج این محققان، در صورت عدم مصرف افزودنی کاهنده آب، با افزایش نرمی سیمان، نیاز به آب مخلوط‌ها افزایش می‌یابد [۱۱].

بر اساس منابع مختلف، فاکتورهای اصلی و موثر در سیمان برای افت اسلامپ بتن سولفات و نوع گچ مصرفی (ژپس، همی‌هیدرات و انیدریت)، مقدار C_3A ، میزان قلیائی‌ها (K_2O و Na_2O)، مقدار C_3S ، دمای هیدراتاسیون، زمان گیرش (آنی و کاذب) و نرمی آن هستند.

۲-۳- افزودنی‌ها؛

برای پیشگیری از مشکل افت اسلامپ، مصرف افزودنی‌های فوق‌روان‌کننده، دیرگیرکننده و سیمان‌های پرتلند-پوزولانی می‌تواند مناسب باشد [۱۴-۱۲]. هرسی (۱۹۷۵) با مطالعه تعدادی از مواد افزودنی (کاهنده آب، کندگیرکننده، فوق‌روان‌کننده و ماده افزودنی متراکم‌ساز) متوجه شد که استفاده از آب برای بازگرداندن اسلامپ تأثیر منفی بر خواص بتن، به ویژه برای مخلوط‌های بتنی با مواد پوزولانی دارد. جبران افت اسلامپ به کمک افزودنی‌ها، تأثیر منفی نداشته و یا در بعضی موارد خاصیت ترکیبات مختلف بتن را بهبود بخشد. پس از آن محققان دیگری همچون می‌یر و پرنچیو (۱۹۷۹) و الصیاد و همکاران (۲۰۰۴) نیز بر نتایج هرسی صحت‌گذاری نمودند [۱۵-۱۸].

پرنچیو و همکاران (۱۹۷۸) بتن‌هایی با فوق‌روان‌کننده در دوزهای مختلفی تهیه نمودند و برای مخلوط‌های

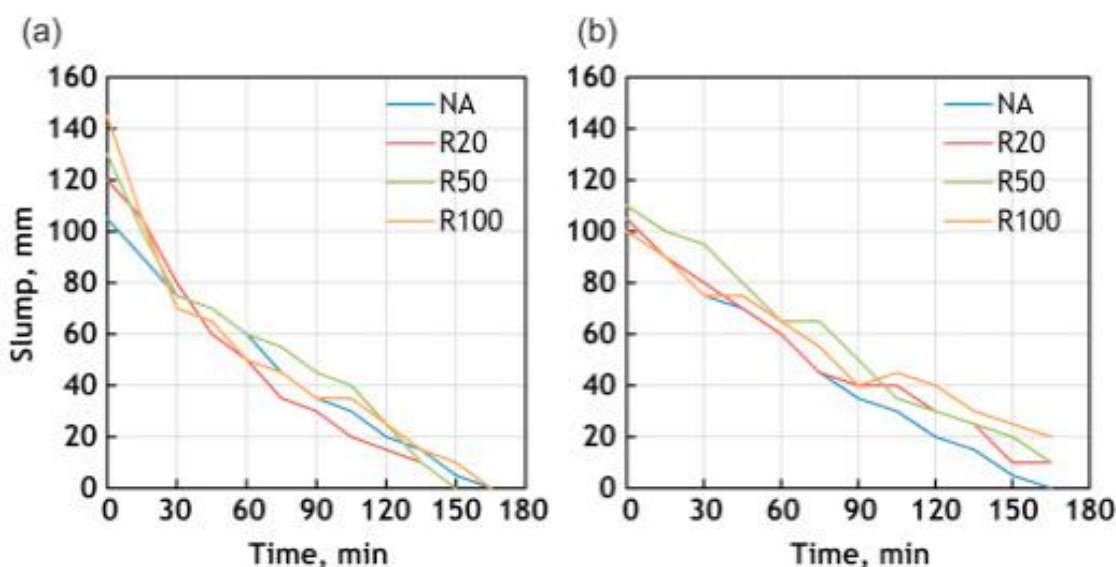
آزمایشگاهی زمان گیرش، جمع‌شدگی، افت اسلامپ، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر انجماد و ذوب شدن در آب را تعیین کردند. نتایج آنها نیز موید تأثیر پارامتر زمان گیرش در افت اسلامپ بود [۱۹].

از آنجا که پدیده افت اسلامپ در بتن‌های حاوی افزودنی کاهنده آب و با نسبت آب به مواد پودری پایین مانند بتن خودتراکم با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد، نصیرنیا و همکاران (۱۳۹۵) تحقیقی انجام دادند که در آن طرح اختلاط‌های حاوی پوزولان طبیعی پومیس در چهار مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی، جایگزین سیمان کردند و در دو نسبت آب به مواد پودری ۰/۳۶ و ۰/۴۰ را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای بررسی میزان افت روانی از آزمایش‌های جریان اسلامپ و آزمایش کیف ۷ شکل در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که مقاومت فشاری و حفظ جریان اسلامپ بتن خودتراکم با گذشت زمان، در نمونه‌های حاوی پوزولان پومیس با شدت بیشتری نسبت به بتن بدون پوزولان کاهش می‌یابند و با افزایش نسبت آب به مواد پودری و کاهش مقدار فوق‌روان‌کننده، افت روانی بتن و کاهش مقاومت (فشاری و کششی)، تشدید می‌گردد [۲۰].

اثبات شده است که میزان جذب یک پلیمر بر روی سطح سیمان مهم است. اگر دوز پلیمر بسیار پایین‌تر از مقدار موردنیاز باشد، ممکن است به افت اسلامپ بتن منتهی شود. اگر دوز زیاد باشد، می‌توان حفظ اسلامپ خوبی برای بتن انتظار داشت (Schober and Flatt, 2006). نمودارهای شکل ۱ حفظ کارایی طی زمان برای مخلوط‌های بتنی ساخته شده با (الف) مصالح بازیافتی (RA) خشک و (ب) مصالح بازیافتی اشباع با سطح خشک، مصالح طبیعی (NA^4)، R20، R50 و R100 به ترتیب ۲۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ مصالح بازیافتی را نشان می‌دهند [۲۱].

³ Recycled Aggregate (RA)

⁴ Non Admixture (NA)



شکل ۱- مقایسه روند افت اسلامپ برای بتن با درصد‌های مختلفی از مصالح سنگدانه‌ای بازیافتی خشک، SSD و طبیعی [۲۱]

است مربوط به عملکرد تاخیر در تشکیل اترینگایت از واکنش C_3A و گچ در سیمان باشد [۲۲].

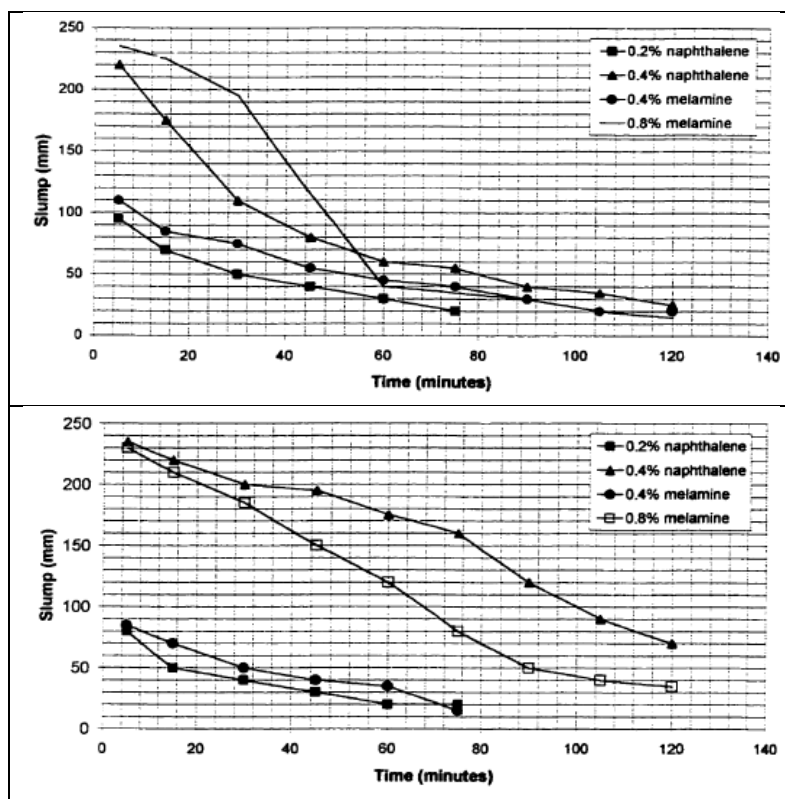
کلپاردی و همکاران (۱۹۷۹) تأثیر فوق‌روان‌کننده نفتالینی و سولفوناتی را بر افت اسلامپ، هیدراتاسیون سیمان پرتلند و ویژگی‌های بتن بررسی کردند. آزمایش‌های مربوط به از افت اسلامپ آنها نشان داد که فوق‌روان‌کننده مورد استفاده باعث می‌شود، بتن برای مسافت‌های طولانی مناسب حمل و نقل باشد [۲۳].

مصرف افزودنی کاهنده آب لیگنوسولفونات با سیمان پرقلیا منجر به افزایش زیاد پیک حرارت هیدراتاسیون به دمای بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. در حالیکه کاهنده آب مذکور در سیمان کم‌قلیا کندگیر شدن ملایمی ایجاد می‌کند، در سیمان‌های پرقلیا اثر تسریع‌کننده دارد. در نتیجه روند افت اسلامپ در سیمان کم‌قلیا سریعتر دیده می‌شود (شکل ۲) [۲۴].

کوپولا و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای به اثربخشی یک فوق‌روان‌کننده بر پایه فسفونات (PNH°) برای بتن مخلوط آماده پرداخته‌اند. آنها نمونه‌های بتنی با کارایی اولیه ثابت (اسلامپ ۲۲۰ میلی‌متر) را تولید کردند. سپس کارایی در ۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه برای ارزیابی عملکرد حفظ اسلامپ اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج این محققان نشان داد که افزودنی‌های بر پایه فسفونات نسبت به افزودنی‌های بر پایه نفتالن سولفونات (NSF) عملکرد بهتری را در زمینه کاهندگی آب و حفظ کارایی دارد [۲۱].

راماچانداران و همکاران (۱۹۸۹) افت اسلامپ بتن حاوی مقادیر مختلف ملامین فرمالدئید سولفونات (SMF) با دو پلیمر را بررسی نمودند. بر اساس این نتایج، افزودن ۰.۲٪ از پلیمر به SMF باعث افت اسلامپ بتن می‌شود، هر چند که زمان گیرش اولیه تاخیر می‌افتد. بر اساس یافته‌های این محققان، کنترل افت اسلامپ در حضور پلیمر مذکور ممکن

⁵ phosphonate-based superplasticizers (PHN)



شکل ۲- مقایسه روند افت اسلامپ بتن حاوی افزودنی با سیمان کم‌قلیا (بالا) و سیمان با قلیائی زیاد [۲۴]

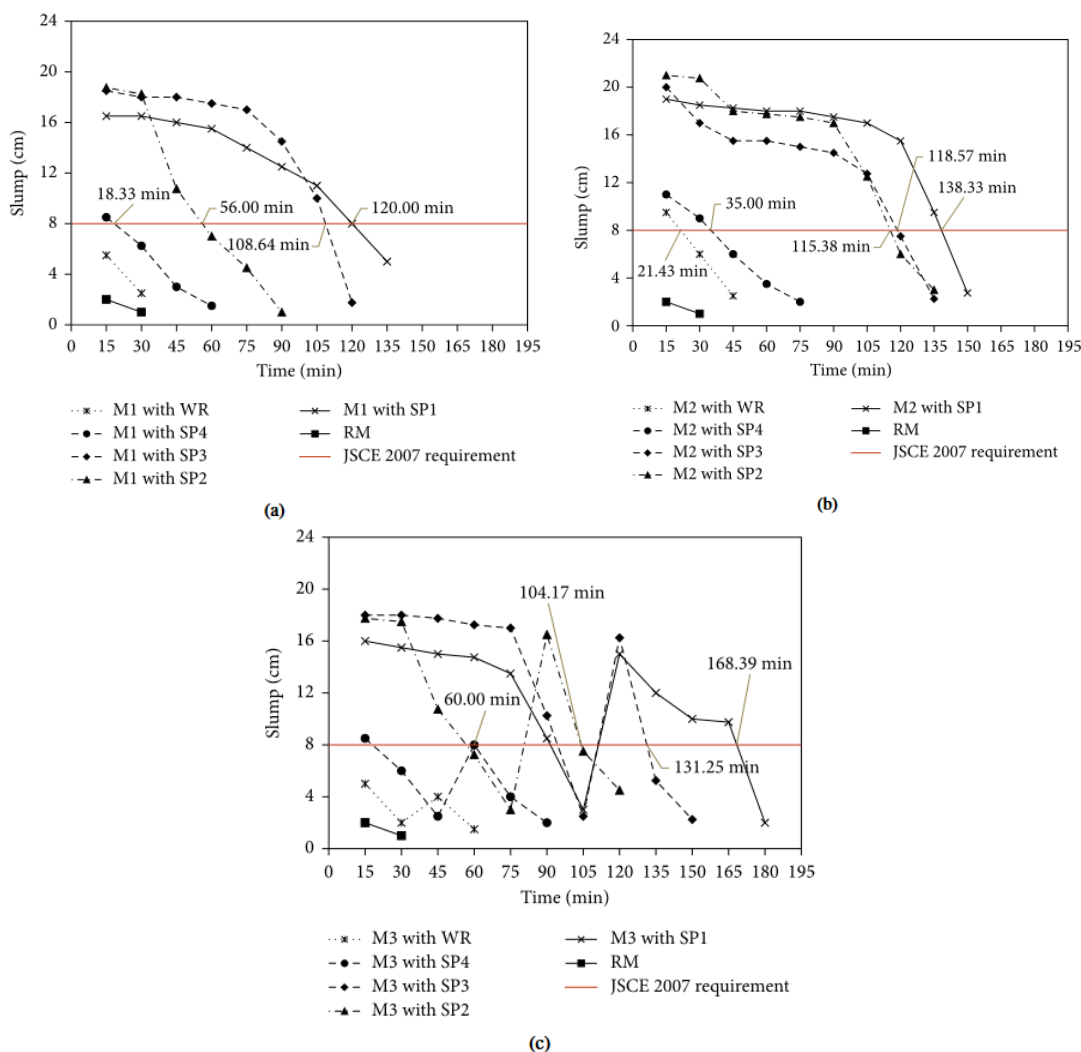
چندرا و جورماستروم (۲۰۰۲) روان‌کننده‌های بر پایه لیگنوسولفونات (LS)، ملامین فرمالدئید اسید سولفونیک (SMF)، اسید سولفونیک نفتالین فرمالدئید (SNF)، و پلیمر اکریلیک اسید (CE) با سیمان پرتلند معمولی (OPC) در آب‌های مختلفی را آزمایش کردند. نتایج آنها نشان داد که روان‌کننده‌ها مختلف رفتار متفاوتی دارند و افزایش دوز روان‌کننده‌های CE بسیار موثر از روان‌کننده‌های LS، SNF و SP برای افزایش سیالیت می‌باشد [۲۷].

محمد و همکاران (۲۰۱۷) برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های بتنی مختلفی با استفاده از پنج ماده افزودنی (لیگنوسولفونات، نفتالین، پلی کربوکسیلات، پلی کربوکسیلیک نسل دوم و پلیمر آلی)، آزمایش اسلامپ در فواصل ۱۵ دقیقه انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که بتن‌های دارای فوق‌روان‌کننده بر پایه نفتالین سولفوناته و پلی اتیلن اتر نسل دوم بهترین عملکردها را در دو حالت (بتن تازه و سخت‌شده) نشان می‌دهند. (شکل ۳) [۲۸].

راماچاندران (۱۹۸۱) تأثیر افزودنی کاهنده آب‌کننده بر افت اسلامپ بتن فوق‌روان را مطالعه نمود. بر اساس مطالعات او، اسلامپ اولیه بتن با افزودن مولین فرمالدئید سولفونیت (SMF^۶) افزایش می‌یابد، اما طی حدود دو ساعت به مقدار کمی کاهش می‌یابد. افت اسلامپ در بتن حاوی SMF می‌تواند با افزودنی‌های مختلف کنترل شود. گلوکونات سدیم بسیار کارآمد است. این ماده می‌تواند به عنوان بازدارنده خوب هیدراتاسیون C3S و پراکنده‌ساز ذرات سیمان عمل کند [۲۵].

اختلاط برخی از ترکیباتی سیمان و فوق‌روان‌کننده‌ها (نفتالینی یا ملامینی - PNS یا PMS) منجر به افت سریع اسلامپ می‌شود که با افزودن سولفات‌های قلیایی قابل بهبود هستند. به نظر می‌رسد تعیین مقدار بهینه قلیایی‌های محلول برای سیمان همراه با افزودنی‌های مذکور وجود دارد [۲۶].

^۶ Sulfonated Melamine Formaldehyde (SMF)



شکل ۳- مقایسه روند افت اسلامپ در بتن‌های حاوی انواع افزودنی‌های روان‌کننده [۲۸]

۲-۴- طرح مخلوط:

پارامترهای طرح مخلوط مانند عیار سیمان، مقدار آب و نسبت آب به سیمان اثرات واضحی در افت اسلامپ دارد. کاهش عیار سیمان در مخلوط بتن می‌تواند نتایج مطلوبی را در بر داشته باشد. به طور معمول، آب مورد نیاز برای ایجاد کارایی بتن، بیشتر از آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان است. سخت شدن و افت اسلامپ بتن، مقدار آب آزاد در اختلاط بتن را کاهش می‌دهد و منتهی به افت اسلامپ بتن می‌شود. افت سریع اسلامپ می‌تواند به سرعت ۵۰ میلی‌متر در ۱۵ دقیقه باشد و از اسلامپ ۱۲۵ میلی‌متر به صفر در ۶۰ دقیقه برسد. این موضوع باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود، زیرا در عمل به جای استفاده از

تانگچرپیات و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی اثرات نرمی و جایگزینی خاکستر بادی بر خصوصیات بتن تازه و سخت شده (ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی) پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که افت اسلامپ در بتن با سنگدانه بازیافتی و خاکستر بادی کمتر از فاقد خاکستر بادی بوده و هنگامیکه نرمی خاکستر بادی افزایش یابد، روند افت اسلامپ افزایش می‌یابد. در این مقایسه بتن‌های حاوی مصالح بازیافتی نسبت به بتن معمولی دچار افت اسلامپ سریع‌تری شده‌اند. با این حال، استفاده از خاکستر بادی جایگزین سیمان پرتلند نوع I برای کاهش سرعت افت اسلامپ مؤثر شناخته شد [۲۹].

مواد روان کننده، برای جبران افت اسلامپ، آب به مخلوط اضافه می‌شود.

مصالح اولین نقطه برای رصد مشکل افت اسلامپ است. سنگدانه‌ها با رطوبت کمتری نسبت به شرایط اشباع با سطح خشک (SSD)، در هنگام افزودن به مخلوط کن و در هنگام مخلوط کردن، آب جذب می‌کنند. بازیابی مخلوط با آب می‌تواند به طرز چشمگیری باعث کاهش مقاومت فشاری شود.

۲-۵- عوامل اجرایی:

پر واضح است که عوامل اجرایی مانند فاصله حمل، ماشین‌آلات و تجهیزات حمل بتن و حتی تجربه پرسنل در کنترل اسلامپ بتن بسیار موثر است.

راهکارهای ساده برای پیشگیری از افت اسلامپ: ۱- جلوگیری از تاخیر طی حمل و بتن‌ریزی (برنامه‌ریزی زمانی مناسب)، ۲- کنترل دما (کاهش دمای مصالح سنگدانه‌ای، بتن تازه و تراک میکسر حمل بتن)، ۳- مرطوب کردن سنگدانه‌ها قبل از اختلاط در بتن، ۴- بالا بردن

اسلامپ اولیه بتن، ۵- مصرف افزودنی روان کننده بتن، ۶- مصرف افزودنی دیرگیرکننده بتن است [۳۰]. سورینکاتا (۲۰۱۵) روش‌های زیر را برای مدیریت افت اسلامپ بتن تازه پیشنهاد نموده است: ۱- اسلامپ اولیه بالا، ۲- استفاده از کندگیرکننده‌ها، ۳- استفاده از روان کننده یا فوق‌روان کننده، ۴- استفاده مجدد از افزودنی در پای کار، ۵- استفاده از حداکثر مقدار مصرف افزودنی، ۶- پایین نگه داشتن دامی بتن، ۷- استفاده از افزودنی سازگار با سیمان [۳۱].

با توجه به عوامل معرفی شده در افت اسلامپ بتن، هدف از این مطالعه بررسی فقط یک عامل نرمی سیمان می‌باشد.

مواد و برنامه آزمایشگاهی

در ابتدا یک نمونه سیمان پرتلند نوع ۲ از مجتمع صنعتی سیمان تهران تهیه شد و به کمک آسیاب آزمایشگاهی چهار نوع نرمی با شاخص‌های بلین ۲۸۰۰، ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم ایجاد گردید (شکل ۵).



شکل ۵- تهیه نمونه سیمان و انجام پروژه- مجتمع صنعتی سیمان تهران

در جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها درج شده است.

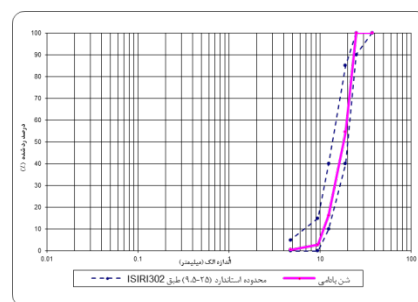
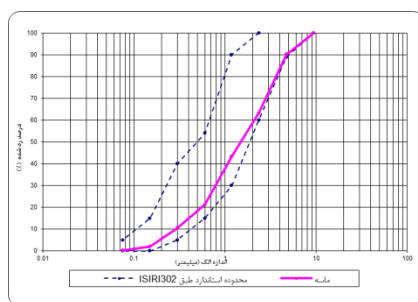
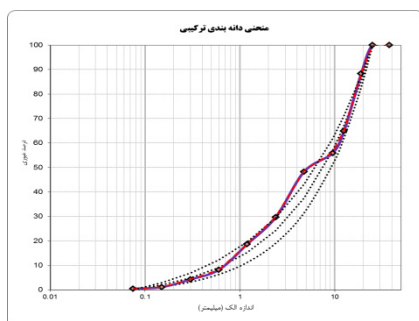
جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های سیمان مورد استفاده در این مطالعه

نام نمونه سیمان	غلظت نرمال	زمان گیرش (دقیقه)		بلین (سانتی‌متر مربع بر گرم)	مانده روی الک (%)		آنالیز شیمی				
		اولیه	نهائی		۹۰ میکرون	۴۵ میکرون	C_3A	C_3S	Na_2O	K_2O	SO_3
پ ۲۸۰۰	۲۴/۵	۲۱۰	۲۹۵	۲۸۴۶	۰/۸	۶/۰	۵/۲	۵۵/۵	۰/۱۳	۰/۵۵	۲/۲۲
پ ۳۰۰۰	۲۵/۰	۱۹۵	۲۸۰	۲۹۵۱	۰/۶	۵/۴					
پ ۳۲۰۰	۲۵/۵	۱۹۵	۲۷۵	۳۱۵۲	۰/۴	۵/۲					
پ ۳۴۰۰	۲۵/۵	۱۹۰	۲۷۵	۳۳۷۶	۰/۳	۳/۹					

شکل ۶ و جدول ۲ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از جنوب تهران می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	مدول نرمی (FM)	درصد جذب آب	چگالی (SSD)	درصد شکستگی	درصد گذشته از الک ۲۰۰
شن نیمه شکسته (بادامی)	-	۱/۸۱	۲/۵۴	۵۵	۰/۵
ماسه نیمه شکسته	۳/۷	۲/۸۵	۲/۵۵	*	۱/۹



شکل ۶- نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

(میانگین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد [۳۲]. برای تهیه این مخلوط ۶۰ درصد ماسه با ۴۰ درصد شن درشت استفاده شد (نمودار شکل ۴). در این تحقیق مبنای تهیه مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی، رسیدن به کارایی مناسب (اسلامپ 12 ± 0.5 سانتی‌متر) بود. سپس مقاومت آزمون‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روزه اندازه‌گیری شدند. (شکل ۷)

در کلیه مخلوط‌ها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمون‌گرها و شرایط عمل‌آوری تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر بلین سیمان مصرفی باشد (شکل ۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها نیز 350 kg/m^3 بود. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود $n:0.35$



شکل ۷- نماهایی از انجام آزمایش‌ها

روند افت اسلامپ طی یک ساعت نیز اندازه‌گیری شد (شکل ۸). پس از افت اسلامپ طی یک ساعت، آب به بتن اضافه شد تا دوباره به اسلامپ اولیه (12 ± 0.5 سانتی‌متر) حاصل شود.



شکل ۸- اندازه گیری روند افت اسلامپ طی یک ساعت

نتایج، بحث و تحلیل:

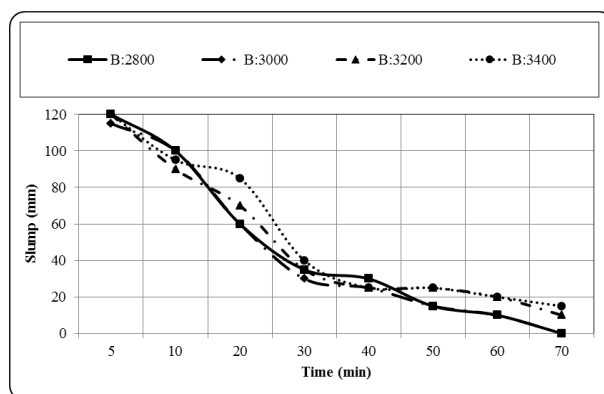
در جدول ۳ خلاصه نتایج آزمایش‌ها بر روی مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی دیده می‌شود.

جدول ۳- خلاصه نتایج آزمایش‌ها بر روی مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی

نام نمونه سیمان	اسلامپ (میلی‌متر)							
	۵ دقیقه	۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۵۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۷۰ دقیقه
ب ۲۸۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۶۰	۳۵	۳۰	۱۵	۱۰	۰
ب ۳۰۰۰	۱۱۵	۱۰۰	۶۰	۳۰	۲۵	۱۵	۱۰	۰
ب ۳۲۰۰	۱۲۰	۹۰	۷۰	۳۵	۲۵	۲۵	۲۰	۱۰
ب ۳۴۰۰	۱۲۰	۹۵	۸۵	۴۰	۲۵	۲۵	۲۰	۱۵

همانگونه که اشاره شد، ساخت مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی با چهار نمونه سیمان طی دو مرحله انجام شد. در نمونه‌گیری مرحله دوم با عنوان "تاخیری" پس از سپری شدن یک ساعت و افت اسلامپ بتن، به مخلوط بتنی آب اضافه شد تا مجدداً اسلامپ اولیه ایجاد شود. علت این کار شباهت‌سازی با شرایط سنتی کارگاه‌ها است که پس از افت اسلامپ، بدون مصرف افزودنی، آب به بتن اضافه می‌گردد تا کارایی لازم ایجاد گردد. در ادامه به مقایسه نتایج مقاومت حاصله برای هشت مخلوط بتنی پرداخته می‌شود.

جهت بررسی بهتر روند افت اسلامپ، نمودار اسلامپ-زمان برای همه مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی ترسیم شد (شکل ۹). نتایج نشان دادند که روند افت اسلامپ در چهار نمونه اختلاف بسیار زیادی نشان نمی‌دهند، اما در نمونه سیمان‌های با نرمی بیشتر (یعنی دارای شاخص بلین بالاتر) روند افت اسلامپ کمتر است. دلیل این موضوع آنست که اولاً در نمونه سیمان‌های نرم‌تر جهت تهیه مخلوط بتنی آب بیشتری مصرف شده است (جدول ۴)؛ بنابراین واضح است که باید روند افت اسلامپ کندتری را نشان دهد.

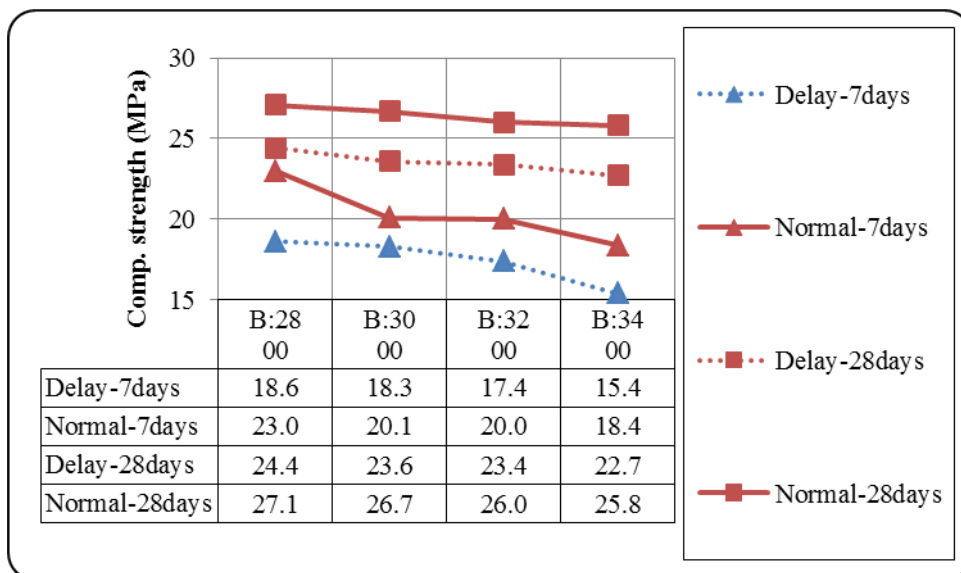


شکل ۹- نتایج روند افت اسلامپ در نه نمونه سیمان این تحقیق

جدول ۴- خلاصه نتایج مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی (دو روش نمونه‌گیری معمولی و با تاخیر- پس از افت اسلامپ و افزودن آب)

نام نمونه سیمان	نمونه‌گیری معمولی				نمونه‌گیری با تاخیر			
	بتن تازه		مقاومت فشاری بتن سخت شده (مگاپاسکال)		بتن تازه		مقاومت فشاری بتن سخت شده (مگاپاسکال)	
	نسبت آب به سیمان	اسلامپ (میلی‌متر)	۷روزه	۲۸روزه	۷روزه	۲۸روزه	۷روزه	۲۸روزه
ب۲۸۰۰	۰/۵۸	۱۲۰	۲۳/۰	۲۴/۴	۰/۶۴	۱۲۰	۱۸/۶	۲۷/۱
ب۳۰۰۰	۰/۵۹	۱۲۰	۲۰/۱	۲۳/۶	۰/۷۰	۱۲۰	۱۸/۳	۲۶/۷
ب۳۲۰۰	۰/۵۹	۱۲۰	۲۰/۰	۲۳/۴	۰/۷۰	۱۲۰	۱۷/۴	۲۶/۰
ب۳۴۰۰	۰/۶۰	۱۲۰	۱۸/۴	۲۲/۷	۰/۷۲	۱۲۰	۱۵/۴	۲۵/۸

جهت مقایسه نتایج، نمودار بلین-مقاومت فشاری برای دو سری مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی ترسیم شد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نتایج روند افت اسلامپ در نه نمونه سیمان این تحقیق

بطور خلاصه این نتایج نشان داد که:

پس از یک ساعت با افزایش بلین سیمان کاهش

یافته است.

۳- نتایج نشان می‌دهد که در تولید سنتی بتن که به نسبت آب به سیمان توجه نمی‌شود و تنها عیار و اسلامپ بتن مطرح است، استفاده از سیمان با نرمی زیاد می‌تواند منجر به افزایش آب مصرفی در زمان تولید و پای کار شود و در عمل، نسبت آب به سیمان افزایش پیدا کرده و نتایج مقاومت فشاری بتن کمتر شود.

نتایج مقاومت ۷روزه نشان داد که برای مخلوط‌های بتن‌های آزمایشگاهی محتوی سیمان‌های با بلین به

۱- با افزایش بلین مقدار آب لازم برای رسیدن به اسلامپ اولیه ۱۲۰ میلی‌مترافزایش یافته و به تبع آن نسبت آب به سیمان افزایش یافته است. در نتیجه، مقاومت فشاری ۷روزه برای نمونه‌های بدون آب افزوده، کاهش پیدا کرده است.

۲- پس از یک ساعت، مقدار کل آب آزاد (آب آزاد در ساخت اولیه به علاوه آب افزوده شده پس از یک ساعت برای بازیابی اسلامپ) با افزایش بلین افزایش پیدا کرده و به تبع آن نسبت آب به سیمان زیاد شده است. در نتیجه مقاومت بتن‌های با آب افزوده

ترتیب ۲۸۰۰، ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم تهیه شده به روش معمولی، در مقایسه با مخلوط‌های بتن‌های آزمایشگاهی که با سیمان‌های دارای بلین به ترتیب ۲۸۰۰، ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم پس از افت اسلامپ (طی یک ساعت)، با افزودن آب به اسلامپ اولیه (۱۲ سانتی‌متر) رسانده شده بودند، افت مقاومت به ترتیب ۰/۲۴٪، ۰/۱۰٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۱۹٪ مشاهده گردید. همچنین این مقایسه برای نتایج ۲۸ روزه به ترتیب ۰/۱۱٪، ۰/۱۳٪، ۰/۱۱٪ و ۰/۱۴٪ می‌باشد. بنابراین با افزایش بلین از ۳۰۰۰ به ۳۴۰۰ سانتی‌متر بر گرم، روند افت مقاومت بطور واضح افزایشی است.

در مخلوط‌های بتن‌های آزمایشگاهی که با سیمان‌های دارای بلین به ترتیب ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم بوده و به روش معمولی تهیه شده بودند، نسبت به مخلوط شاهد تهیه شده با سیمان دارای بلین ۲۸۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم، افت مقاومت ۷ روزه به ترتیب ۰/۱۴٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۲۵٪ بود که بیانگر تاثیر منفی بلین بالاتر بر مقاومت بتن می‌باشد. این مقایسه برای نتایج ۲۸ روزه به ترتیب ۰/۱٪، ۰/۴٪ و ۰/۵٪ می‌باشد.

در مخلوط‌های بتن‌های آزمایشگاهی حاوی سیمان‌های با بلین به ترتیب ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم که پس از یک ساعت افت اسلامپ با افزودن آب به اسلامپ اولیه یعنی ۱۲ سانتی‌متر رسانده شده بودند، افت مقاومت نسبت به مخلوط شاهد (تهیه شده با سیمان دارای بلین ۲۸۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم)، افت مقاومت به ترتیب ۰/۲٪، ۰/۷٪ و ۰/۲۱٪ بود که بیانگر تاثیر منفی بلین بالاتر بر مقاومت بتن می‌باشد. این مقایسه برای نتایج ۲۸ روزه به ترتیب ۰/۳٪، ۰/۴٪ و ۰/۷٪ است.

این مقایسات برای نتایج ۲۸ روزه نیز نشان داد که روند به ترتیب مذکور بود. در مجموع افت مقاومت در مخلوط‌هایی که دچار افت اسلامپ شده بودند و با افزودن آب به اسلامپ اولیه (۱۲ سانتی‌متر) رسانده شده بود، بطور میانگین ۰/۱۴٪ تعیین شد.

نتیجه‌گیری

۱- نتایج مقاومت ۷ روزه نشان داد که با افزایش بلین در آزمون‌های بتنی که پس از افت اسلامپ (طی یک ساعت)، با افزودن آب به اسلامپ اولیه (۱۲ سانتی‌متر) رسانده شده بودند در مقایسه با آزمون‌هایی بتنی تهیه شده به روش معمولی، افت مقاومت به ترتیب ۰/۲۴٪، ۰/۱۰٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۱۹٪ مشاهده گردید؛

۲- در سه مخلوط بتن آزمایشگاهی تهیه شده به روش معمولی با بلین ۳۰۰۰، ۳۲۰۰ و ۳۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم، نسبت به مخلوط شاهد (بلین ۲۸۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم)، افت مقاومت ۷ روزه به ترتیب ۰/۱۴٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۲۵٪ بود که بیانگر تاثیر منفی بلین بالاتر بر مقاومت بتن می‌باشد؛

۳- در سه مخلوط بتن آزمایشگاهی که پس از یک ساعت افت اسلامپ با افزودن آب به اسلامپ اولیه یعنی ۱۲ سانتی‌متر رسانده شده بودند، افت مقاومت نسبت به مخلوط شاهد (تهیه شده با سیمان دارای بلین ۲۸۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم)، افت مقاومت به ترتیب ۰/۱۴٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۲۵٪ بود که موید تاثیر منفی بلین بالاتر بر مقاومت بتن است.

قدردانی

از مدیران، کارشناسان و تکنسین‌های محترم شرکت سیمان تهران بابت همکاری‌های صورت گرفته بسیار سپاس‌گذاریم.

- [1] "Slump reduction with time" from: www.eng-tips.com 2001
- [2] "TIP12 Slump loss of concrete" NRMCA, *Technology in practice. What, why & How*
<http://blog.shimibeton.com> "افت اسلامپ بتن" (۱۳۹۳) از:
- [4] V. RAMAKRISHNAN & V. PERUMALSWAMY (1983) "Effect of Hot Climate on Slump Loss and Setting Times for Superplasticized Concretes". *Transportation Research Record* 924, P33-42.
- [5] ASTM C 359 (2003). "Standard Test Method for Early Stiffening of Hydraulic Cement".
- [6] Alfred Gardiner (2013) "Preventing Slump Loss" from: www.concreteconstruction.net
- [7] - N. Roussel*, C. Stefani, R. Leroy. "From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests". *Elsevier, Cement and Concrete Research* 35 (2005) 817– 822.
- [8] S. Jiang, B. Kim, and P. Aitcin, "A Practical Method to Solve Slump Loss Problem in PNS Super plasticized High-Performance Concrete. (1999). " *Cement, Concrete and Aggregates* 22,
- [۹] کفاش، ع. سعیدی، م. "بررسی توامان تغییرات نرمی سیمان در ملات و بتن" کنفرانس بین‌المللی سالانه تحقیقات در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، تهران، ۲۴ آذر ۹۴، ص ۱۲.
- [۱۰] کفاش، ع. نیک‌فال، ز. (۱۳۹۵). "مطالعه اثرات نرمی سیمان در ملات و بتن". سمینار کنترل کیفیت سیمان-تهران-انجمن صنفی کارفرمایان صنعت سیمان-۱۵ و ۱۶ شهریور ۱۳۹۵.
- [11] Ali Mardani & Arif Emre Son & Burak Felekoğlu & Kambiz Ramyar (2017). "Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture". *December 2017 Journal of Green Building* 12(1)
- [12] -ACI 363-R-92 (Reapproved 1997). "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete".
- [13] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD EXECUTIVE COMMITTEE 1986 "FREEZING AND THAWING RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE" NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.
- [14] -Mailvaganam, N. P., 'Factors Influencing Slump Loss in Flouiring Concrete', *Super plasticizers in Concrete, Amer. Conc. Inst. SP-62, 1979, pp. 389–403.*
- [15] Hersey A. T., "Slump loss caused by admixtures", *ACI Journal Vol. 72, 1975, pp. 526-528.*
- [16] Meyer L. M. and Perenchio W. F., "Theory of concrete slump loss as related to the use of chemical admixtures", *Concrete International, 1979, pp. 36-43.*
- [17] Meyer L. M. and Perenchio W. F., "Theory of concrete slump loss as related to the use of chemical admixtures", *Concrete International, 1979, pp. 36-43.*
- [18] Hanaa Elsayad & Gamal Elsayed Abdelaziz & Assisstant Professor (August 2004). "A NEW APPROACH FOR CONTROLLING THE SLUMP LOSS IN READY MIXED CONCRETE". From www.researchgate.net
- [19] Perenchio, W. F., Whiting, D. A. and Kantro, D. L., 'Water Reduction, Slump Loss and Entrained Air Void System as Influenced by Super plasticizers', *Proceedings of International Symposium on Super plasticizers in Concrete (CANMET, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1978) Vol. 1, pp. 295–324.*

[۲۰] نصیرنیا، اسماعیل؛ سپیده رحیمی؛ سیدیاسین موسوی و محسن قاسمی، ۱۳۹۵، بررسی پدیده افت جریان اسلامپ و خواص بتن سخت شده خودتراکم حاوی پوزولان طبیعی پومیس، کنفرانس بین المللی اقتصاد، مدیریت، روانشناسی، قم، دانشگاه علمی کاربردی استناداری قم

[21] -R. Flatt, I. Schober (2012). "Super plasticizers and the rheology of concrete". in *Understanding the Rheology of Concrete*

[22] Luigi Coppola & Sergio Lorenz & Patricia Kara & Stefano Garlati (2017). "Performance and Compatibility of Phosphate-Based Super plasticizers for Concrete". *Buildings* 2017, 7(3), 62.

[23] Ramachandran, V.S. & Beaudoin, J.J. & Shiva, Z (1989). "Control of Slump Loss in Super plasticizer Concrete". *Mater. Struct.* 1989, 22, 107-111.

[24] Collepardi, M., Corradi, M. and Valente, M., 'Low Slump Loss Super plasticized Concrete. I. Influence of a Naphthalene-Sulfonated Polymer Based Super plasticizer on the Cement Hydration', *Trans. Res. Rec. (720) (1979) 7-12.*

[25] EDGAR FURTADO (1999). "TESTING FOR CEMENT-ADMIXTURE INCOMPATIBILITY". *Thesis for the Degree of Master, University of Toronto.*

[26] -Ramachandran. "Effect of Retarders Water Reducers on Slump Loss in Super plasticized Concrete". *NRC Publications Record, American Concrete Institute Special Publication 68, 1981*

[27] -B. -G. Kim, S. P. Jiang & P. -C. Aitcin (2000). "Slump improvement mechanism of alkalis in PNS superplasticized cement pastes". *Materials and Structures, volume 33, pages 363-369 (2000)*

[28] -Chandra & JBJörnström "Influence of super plasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars—Part II". *Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 10, October 2002, Pages 1613-1619.*

[29] Tarek Uddin Mohammed & Tanvir Ahmed & Shibly Mostafiz Apurbo & Tahir Absar Mallick & Farhan Shahriar & Abdul Munim & Mohammad Abdul Awal. "Influence of Chemical Admixtures on Fresh and Hardened Properties of Prolonged Mixed Concrete". *Advances in Materials Science and Engineering, 2017*

[30] Weerachart Tangchirapat & Chaiyanunt Rattanashotinunt & Rak Buranasing & Chai Jaturapitakkul. (2013). "Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates". *American Society of Civil Engineers.*

[۳۱] "دلایل افت اسلامپ بتن و راهکارهای حفظ اسلامپ بتن" (۲۰۲۰)، از: www.ramkaco.com

[32] Suryakanta. (March 2, 2015) "HOW TO MANAGE SLUMP LOSS IN FRESH CONCRETE?" *Concrete, Concrete Technology, How To, Materials.*

[۳۳] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.