

## بررسی تأثیر استفاده از پودر شیشه و متاکائولن بر خواص بتن خودتراکم

محمد عباسی رشت آبادی \*

دانشجوی دکتری گرایش سازه رشته مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

ملک محمد رنجبر

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

رحمت مدن دوست

دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

### چکیده

پودر شیشه و متاکائولن بعنوان جایگزینی مناسب برای بخشی از سیمان در ساخت بتن مطرح هستند. استفاده از پودر شیشه زائد در بتن دارای صرفه اقتصادی بالا بوده و اثرات زیست محیطی ناشی از رها سازی شیشه باز باقی در طبیعت را کاهش می دهد. از دیگر سوی متاکائولن نیز به خاطر خواص پوزولانی باعث افزایش مقاومت در بتن می شود. در این مطالعه با بکارگیری هم زمان این دو ماده در ساخت بتن خود تراکم، ویژگی های بتن در حالت تازه و سخت شده ارزیابی می شود. به این منظور، هفده طرح اختلاط بتن حاوی متاکائولن و پودر شیشه با دو نرمی مختلف با درصد های جایگزینی (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) در نسبت آب به مواد چسباننده ۰/۳۲ ساخته شد. کلیه طرح اختلاط های بتن خود تراکم تحت آزمایش های بتن تازه شامل جریان اسلامپ، T50، جعبه L و قیف V و برای شرایط بتن سخت شده تحت آزمایش های فشاری و کششی و جذب آب قرار گرفتند. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که با افزایش میزان پودر شیشه جریان اسلامپ و زمان قیف V افزایش و مقاومت های فشاری، کششی و جذب آب اولیه کاهش می یابد. با افزودن متاکائولن و افزایش آن تا ۱۵٪ مقاومت فشاری و کششی افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: بتن خود تراکم، پودر شیشه، متاکائولن، خواص مقاومتی، خواص رئولوژیکی.

## ۱- مقدمه

شود. متاکائولن ماده‌ای بی شکل است و از عناصر لایه‌ای شکل تشکیل شده است [10]. ماده خام ورودی در تولید متاکائولن، رس کائولن است. کائولن یک ماده معدنی بسیار ریز سفید رنگ بوده و به طور سنتی در ساخت چینی استفاده شده است. اگرچه متاکائولن گران قیمت است، اما به خاطر تأثیرات مقاومتی که در بتن دارد استفاده از آن مقرون به صرفه است [10]. استفاده از متاکائولن باعث افزایش مقاومت فشاری [11]، لزجت<sup>۴</sup> و تنش تسلیم<sup>۵</sup> در بتن می‌شود [12]. از دیگر سوی استفاده از درصدهای بالای متاکائولن به جای سیمان باعث کاهش روانی می‌شود [13]. علاوه بر این متاکائولن می‌تواند باعث کاهش افت بتن شده [14] و نفوذ مواد کلریدی را کاهش دهد [15]. اگرچه مطالعات خوبی در مورد استفاده از پودر شیشه و متاکائولن در بتن صورت گرفته؛ اما مطالعات محدودی در مورد استفاده همزمان این دو در بتن خودتراکم انجام شده است. با توجه به مسایل محیط زیستی و اهمیت آن این مطالعه بر آن است که با استفاده همزمان روند مناسبی را ارائه دهد و با استفاده از آزمایش‌های بتن تازه شامل جریان اسلامپ، T50، قیف V و جعبه L و آزمایش‌های بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب به ارزیابی خواص بتن خود تراکم حاوی پودر شیشه و متاکائولن پرداخته شود.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- مصالح مصرفی

در این مطالعه از شن با حداکثر اندازه ۱۲ میلیمتر و وزن مخصوص واقعی ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب و جذب آب ۱٪ استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی شن عبوری مطابق با استاندارد ASTM C33 است. دانه‌بندی ماسه مصرفی ترکیبی از اندازه اسمی ۰ تا ۳ میلیمتر و ۳ تا ۶ میلیمتر بوده و دارای وزن مخصوص ۲/۶۵ بر سانتی متر مکعب و جذب آب ۱/۴۵٪ است. دانه‌بندی ماسه مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C33 است. سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ بوده و دارای وزن مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. ویژگی سیمان مورد استفاده در جدول ۱

بازیافت و کاهش میزان زباله‌ها از مهم‌ترین فاکتورها در مدیریت مواد زائد هستند [1]. در سراسر جهان به دلیل رشد جمعیت، مقدار و تنوع زباله‌ها روز به روز در حال افزایش است [2]. در این شرایط استفاده از روش‌هایی مناسب برای کاهش تولید زباله‌ها و یا تقلیل تأثیر آن‌ها بر محیط زیست امری ضروری است. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای جلوگیری از افزایش زباله‌ها استفاده از سیستم بازیافت و تولید مجدد مواد زائد است. با این روش می‌توان از ورود بخشی از مواد زائد به طبیعت جلوگیری کرده و محصولات جدیدی را تولید نمود. با این حال در برخی از موارد به خاطر محدودیت‌هایی، امکان بازتولید مواد زائد وجود ندارد [3]. شیشه یکی از موادی است که به دلیل محدودیت کیفیت، امکان بازتولید فرآورده‌های جدید از آن وجود ندارد؛ اما به دلیل مقدار زیاد سیلیکون و کلسیم در شیشه می‌توان از پودر آن به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان در ساخت بتن استفاده نمود و مانع از ورود زباله‌های شیشه‌ای به طبیعت شد [4]. یکی از انواع بتن که می‌توان از پودر شیشه در ساخت آن استفاده کرد؛ بتن خودتراکم است. بتن خودتراکم به خاطر ویژگی‌های خاص خود به‌تازگی<sup>۱</sup> به طور گسترده در ساخت و سازه‌ها استفاده می‌شود. این نوع بتن بدون نیاز به ویریه و تنها به‌واسطه وزن خود در قالب‌های بتن‌ریزی جای می‌گیرد [5] و بدون آب‌انداختگی<sup>۱</sup> و جداشدگی<sup>۲</sup> سنگ‌دانه‌ها، چسبندگی خود را حفظ می‌کند [6]. مطالعات نشان می‌دهد با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های شیشه بازیافتی در بتن خودتراکم جریان اسلامپ، درصد انسداد و درصد هوای مخلوط افزایش و مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته آن کاهش می‌یابد [7]. همچنین استفاده از پودر شیشه به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان میزان واکنش‌های قلیایی در بتن را کاهش می‌دهد [8]. علاوه بر این استفاده از پودر شیشه در مقایسه با خاکستر بادی، انقباض<sup>۳</sup> بتن خودتراکم را افزایش می‌دهد [9].

متاکائولن ماده دیگری است که به دلیل دارا بودن خواص پوزولانی به‌عنوان جای‌گزینی برای سیمان در بتن استفاده می

4 - Viscosity

5 - Yield stress

1 - Bleeding

2 - Segregation

3 - Shrinkage

## ۳-۲- آزمایش های بتن

### ۳-۱- بتن تازه

آزمایشات جریان اسلامپ، T50، قیف V و جعبه L برای ارزیابی خواص بتن تازه مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه جریان اسلامپ هنوز بهترین آزمایش برای تعیین خواص رئولوژیکی و تعیین خواص پرکنندگی بتن است؛ اما این آزمایش برای تعیین مقاومت بتن در برابر جداسدگی سنگ‌دانه‌ها کافی نیست. شاخص پایداری چشمی<sup>۱</sup> در آزمایش جریان اسلامپ به عنوان ساده‌ترین روش شناخت پایداری استفاده می‌شود. بر این اساس شاخص خود تراکمی بتن بین ۰ (پایداری بالا) تا ۳ (ناپایداری زیاد) دسته‌بندی می‌شود. عموماً شاخص پایداری چشمی ۱ تا ۰ قابل قبول می‌باشد. لزجت بتن را می‌توان با استفاده از آزمایش قیف V و T50 به دست آورد. در آزمایش قیف V سرعت تخلیه بتن از قیف معیاری برای توانایی پرکنندگی بتن است. در آزمایش T50 اگر بتن در زمانی بیشتر از ۵ ثانیه به قطر ۵۰ سانتی‌متر برسد، لزجت بتن زیاد بوده و اگر در کمتر از ۲ ثانیه به این قطر برسد، در این حالت لزجت بتن کم می‌باشد. در مواردی که لزجت بتن کم است احتمال جداسدگی سنگ‌دانه‌های بتن زیاد است [16]. آزمایش جعبه L نیز به صورت چشمی ملاکی برای تعیین جداسدگی در بتن است.

جدول ۱- خواص فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲

زمان گیرش نهایی (دقیقه)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	نرمی با روش بلین (متر مربع بر گرم)
۲۲۸	۱۶۸	۰٫۳۳

جدول ۲- اجزای شیمیایی موادسیمانی مورد استفاده [13]

متاکائولن	سیمان	اجزای شیمیایی
۰/۱۱	۰/۲۶	Na <sub>2</sub> O
۰/۳۲	۰/۵۴	K <sub>2</sub> O
۰/۰۰	۱/۴۲	SO <sub>3</sub>
۰/۲۱	۱/۸۶	MgO
۰/۲۰	۶۳/۹۵	CaO
۱/۶۰	۳/۴۶	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴۲/۸۰	۵/۵۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۲/۱۰	۲۱/۴۶	SiO <sub>2</sub>

آورده شده است. متاکائولن استفاده شده دارای وزن مخصوص ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب است. اجزای تشکیل دهنده سیمان و متاکائولن در جدول ۲ آورده شده است. علاوه بر این از شیشه ضایعاتی کاملاً خشک و تمیز در این تحقیق استفاده شده است. شیشه مورد استفاده در دستگاه لس آنجلس قرار گرفته و به پودر شیشه تبدیل شده است. GP1 پودر شیشه‌ای است که بعد از ۲ روز و GP2 پودر شیشه‌ای است که بعد از ۴ روز ماندن شیشه در دستگاه لس آنجلس حاصل شده است. پس از اتمام کار دستگاه لس آنجلس، پودر شیشه‌ها از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر عبور داده شده- اند. فوق روان‌کننده مورد استفاده P10-3R بوده و تمام معیارها و استانداردهای اروپا 2-PREN 934 را برآورده می‌کند.

### ۲-۲- روش اختلاط

طرح اختلاط‌ها در ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. گروه اول (G1) شامل پودر شیشه درشت تر، گروه دوم (G2) شامل پودر شیشه ریزتر، گروه سوم (G3) شامل MK (متاکائولن) و پودر شیشه درشت تر و گروه چهارم (G4) شامل MK و پودر شیشه ریزتر. درصد جای‌گزینی متاکائولن یا پودر شیشه با سیمان در هر ۴ گروه فوق عبارت است از ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪. نسبت آب به مواد چسباننده در همه طرح اختلاط‌ها ثابت و برابر ۰/۳۲ می‌باشد. جزئیات طرح اختلاط‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در آزمایشگاه قبل از مخلوط مصالح، مقدار کمی آب به مخلوط‌کن اضافه و مخلوط‌کن شروع به چرخش می‌کند تا اصطکاک مواد با بدنه مخلوط‌کن کمتر شود و همچنین آب محاسبه شده در طرح اختلاط صرف خیس کردن بدنه مخلوط‌کن نشود. در ابتدا شن و ماسه با حدود نصف آب طرح اختلاط مخلوط شد که این مرحله ۲ دقیقه به طول می‌انجامد. پس از آن مواد سیمانی شامل سیمان، پودر شیشه و متاکائولن به مخلوط اضافه شده، سپس آب باقیمانده از طرح اختلاط به مخلوط اضافه می‌شود. بعد از این مرحله فوق‌روان‌کننده و ماده اصلاح‌کننده لزجت که با مقداری از آب طرح اختلاط ترکیب شده به تدریج به مخلوط اضافه خواهد شد. آزمایشات بتن تازه بلافاصله پس از مخلوط مصالح و آزمایشات بتن سخت شده بر اساس برنامه زمان‌بندی انجام می‌شود.

<sup>1</sup> - Visual stability index (VSI)

جدول ۳- مقادیر اجزای تشکیل دهنده مخلوط بتن خودتراکم

نام گروه	نام اختلاط	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	متاکائولن		پودر شیشه		آب Kg/m	ماسه Kg/m <sup>3</sup>	شن Kg/m <sup>3</sup>	کاهنده شدید آب* Kg/m	اصلاح کننده لزجت ** Kg/m <sup>3</sup>
			%	Kg/m <sup>3</sup>	%	Kg/m <sup>3</sup>					
control	Ctrl	۴۸۰	۰	۰	۰	۰	۱۵۴	۹۶۷	۸۱۷	۳/۵	۱
G1	G11	۴۵۶	۰	۰	۵	۲۴	۱۵۴	۹۸۰	۸۲۰	۳/۴	۰/۶
	G12	۴۳۲	۰	۰	۱۰	۴۸	۱۵۴	۹۸۵	۸۱۵	۳/۲۲	۰/۷
	G13	۴۰۸	۰	۰	۱۵	۷۲	۱۵۴	۹۸۵	۸۱۵	۳/۰۴	۰/۷۶
	G14	۳۸۴	۰	۰	۲۰	۹۶	۱۵۴	۹۸۸	۸۰۵	۲/۸	۰/۸
G2	G21	۴۵۶	۰	۰	۵	۲۴	۱۵۴	۹۸۰	۸۲۰	۳/۴	۰/۶
	G22	۴۳۲	۰	۰	۱۰	۴۸	۱۵۴	۹۸۰	۸۱۵	۳/۲۲	۰/۷
	G23	۴۰۸	۰	۰	۱۵	۷۲	۱۵۴	۹۸۵	۸۱۵	۳/۰۴	۰/۷۶
	G24	۳۸۴	۰	۰	۲۰	۹۶	۱۵۴	۹۸۸	۸۰۵	۲/۸	۰/۸
G3	G1MK1	۴۵۶	۲/۵	۱۲	۲/۵	۱۲	۱۵۴	۹۸۰	۸۲۰	۲/۴۹	۰
	G1MK2	۴۳۲	۵	۲۴	۵	۲۴	۱۵۴	۹۸۰	۸۱۵	۲/۶۳	۰
	G1MK3	۴۰۸	۷/۵	۳۶	۷/۵	۳۶	۱۵۴	۹۸۵	۸۱۵	۲/۹۲	۰
	G1MK4	۳۸۴	۱۰	۴۸	۱۰	۴۸	۱۵۴	۹۸۸	۸۰۵	۳/۲۱	۰
G4	G2MK1	۴۵۶	۲/۵	۱۲	۲/۵	۱۲	۱۵۴	۹۸۰	۸۲۰	۲/۴۹	۰
	G2MK2	۴۳۲	۵	۲۴	۵	۲۴	۱۵۴	۹۸۰	۸۱۵	۲/۶۳	۰
	G2MK3	۴۰۸	۷/۵	۳۶	۷/۵	۳۶	۱۵۴	۹۸۵	۸۱۵	۲/۹۲	۰
	G2MK4	۳۸۴	۱۰	۴۸	۱۰	۴۸	۱۵۴	۹۸۸	۸۰۵	۳/۲۱	۰

\* High range water reducer (HRWR)

\*\* Viscosity-Modifying Admixture (VMA)

استاندارد ASTM C140-01 برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد

۱۰۰ میلیمتر و برای سن ۲۸ روز انجام گرفت.

### ۳- نتایج آزمایشات و بررسی آن‌ها

#### ۳-۱- بتن تازه

نتایج آزمایشات بتن تازه و محدوده EFNARC [17] برای جریان اسلامپ، ویسکوزیته و قابلیت عبور در جدول 4 ارائه شده است.

#### ۳-۱-۱- جریان اسلامپ

مقادیر جریان اسلامپ برای همه نمونه‌ها در بازه ۶۶۰ تا ۷۱۵ میلیمتر قرار می‌گیرد (جدول ۴). مطابق EFNARC، میزان جریان اسلامپ باید بیشتر از ۵۰۰ میلیمتر باشد تا بتن خود تراکم بتواند

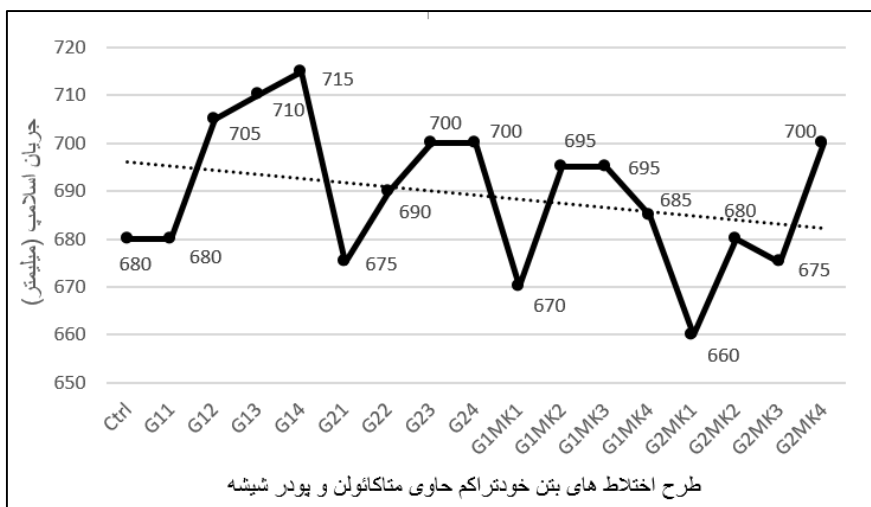
### ۲-۳-۲- بتن سخت شده

خواص مکانیکی بتن خودتراکم معمولی و بتن خودتراکم حاوی ذرات متاکائولن و پودر شیشه با استفاده از آزمایش‌های استاندارد فشاری، کششی (به روش دو نیم شدن استوانه) و جذب آب ارزیابی می‌شود. در این مطالعه از آزمایش فشاری براساس استاندارد ASTM C39-86 با استفاده از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلیمتر و در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز استفاده شد. سرعت بارگذاری برای آزمایش فشاری ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته شد. آزمایش کششی بر مبنای دو نیم شدن استوانه مطابق با استاندارد ASTM C496-90 بوده و در آن نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر با سرعت ۱/۲ مگاپاسکال بر ثانیه در سن ۲۸ روز بارگذاری شد. جذب آب طبق

به طور کامل از میان میلگردهای مقاطع بتنی عبور کند. بر اساس و ستون‌ها مناسب است. شاخص پایداری نیز در بازه قابل قبول ۰ و نتایج بدست آمده از این جدول تمام نمونه‌ها در گروه SF2 قرار ۱ قرار گرفته است. نتایج بدست آمده برای جریان اسلامپ در می‌گیرند. این گروه برای کارهای عمومی ساختمان مانند دیوارها شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات رئولوژیکی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و پودر شیشه به همراه استانداردهای EFNARC

شاخص پایداری چشمی	نسبت انسداد	زمان قیف V (ثانیه)	زمان T50 (ثانیه)	جریان اسلامپ (میلیمتر)	نام اختلاط
۰	۰/۸۴	۶/۱	۳/۲	۶۸۰	Ctrl
۱	۰/۸۳	۶	۲/۵	۶۸۰	G11
۱	۰/۸۶	۸	۳/۱	۷۰۵	G12
۰	۰/۸۷	۸/۷	۳/۲	۷۱۰	G13
۱	۰/۹	۱۱	۴	۷۱۵	G14
۰	۰/۷۸	۶/۹	۲/۵	۶۷۵	G21
۰	۰/۷۹	۹/۱	۳/۶	۶۹۰	G22
۰	۰/۸	۹/۵	۳/۶	۷۰۰	G23
۱	۰/۸۱	۱۱/۸	۴/۷	۷۰۰	G24
۱	۰/۸۱	۷	۳/۵	۶۷۰	G1MK1
۰	۰/۸۹	۱۲	۴/۲	۶۹۵	G1MK2
۱	۰/۸۸	۱۳	۴/۱	۶۹۵	G1MK3
۱	۰/۸۶	۱۵/۲	۵/۱	۶۸۵	G1MK4
۰	۰/۷۷	۹/۷	۳	۶۶۰	G2MK1
۰	۰/۸	۱۳	۴/۱	۶۸۰	G2MK2
۰	۰/۸	۱۴/۶	۵	۶۷۵	G2MK3
۱	۰/۸۵	۱۶	۵/۳	۷۰۰	G2MK4
رده‌های جریان اسلامپ SF1: (۵۵۰-۶۵۰) SF2: (۶۶۰-۷۵۰) SF3: (۷۶۰-۸۵۰)					
رده‌های لزجت VS1/VF1: (8 ≤ زمان قیف V و T50 ≤ 2)					
VS2/VF2: (25 < زمان قیف V و 9 < T50)					
رده‌های قابلیت عبور PA1: (نسبت انسداد ≤ ۰/۸ با دو میلگرد)					
PA2: (نسبت انسداد ≤ ۰/۸ با سه میلگرد)					
استاندارد EFNARC [17]					



شکل ۱- مقایسه جریان اسلامپ در طرح‌های حاوی متاکائولن و پودر شیشه بتن خودتراکم

آهک پرداخته و مطالعه‌ای دیگر [13] که تأثیر متاکائولن بر خواص بتن خود تراکم را بررسی می‌کند، نشان می‌دهد که رابطه مناسبی بین زمان قیف V و T50 برای بتن خود تراکم وجود دارد. در شکل ۳ رابطه بین قیف V و T50 برای نتایج به دست آمده ارائه شده است.

### ۳-۱-۴- جعبه L

مقادیر به دست آمده برای جعبه L در بازه ۰/۷۷ تا ۰/۹ قرار دارد (جدول ۴). اگر چه بعضی از نمونه‌ها در محدوده ارائه شده توسط EFNARC قرار ندارد (جدول ۴)؛ اما بر اساس نتایج تحقیقی مقادیر نسبت انسداد بالاتر از ۰/۶ برای رسیدن به قابلیت پرکنندگی کافی در بتن خود تراکم قابل قبول است [19]. در مطالعه‌ای دیگر رابطه‌ای مناسب برای ظرفیت پرکنندگی بر اساس نسبت انسداد و جریان اسلامپ ارائه شده است [20]. در شکل ۴ رابطه بین نسبت انسداد و جریان اسلامپ بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش جریان اسلامپ نسبت انسداد افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج قسمت‌های قبل افزایش در میزان جریان اسلامپ به دلیل وجود پودر شیشه و متاکائولن و افزایش مقادیر آن‌ها است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پودر شیشه و متاکائولن باعث افزایش نسبت انسداد شده و عبور بتن از بین میلگردها را تسهیل می‌کند.

### ۳-۲- بتن سخت شده

نتایج آزمایشات بتن سخت شده در هر قسمت به طور جداگانه ارائه شده است.

### ۳-۲-۱- مقاومت فشاری

جدول ۵ نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری را به تفکیک سن نمونه‌ها ارائه می‌کند. نتایج به دست آمده در جدول ۵ حاکی از آن است که به طور کلی مقاومت فشاری با افزایش سن بتن بیشتر می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۵۶ روزه به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در کل استفاده از پودر شیشه و افزایش درصد آن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. علاوه بر این پودر شیشه G1 مقادیر مقاومت فشاری کمتری را نسبت به پودر شیشه G2 نشان می‌دهد.

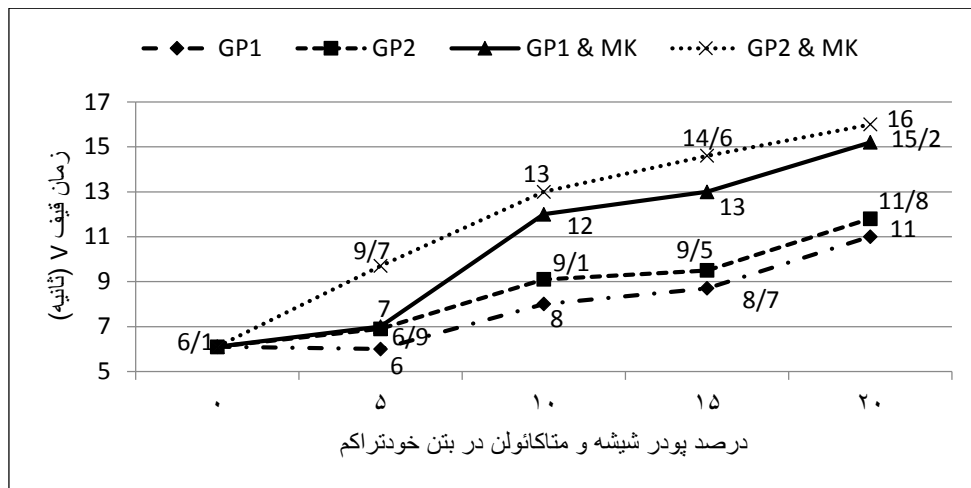
در شکل ۱ ملاحظه می‌شود به طور کلی در هر یک از ۴ گروه با افزایش درصد پودر شیشه یا متاکائولن جریان اسلامپ افزایش می‌یابد؛ اما در کل استفاده از پودر شیشه G2 و یا متاکائولن، افزایش کمتری را نسبت به نمونه کنترل نشان می‌دهد (خط نقطه-چین نشان دهنده این روند است) که این تغییر به خاطر بیشتر بودن سطح مخصوص متاکائولن و پودر شیشه نسبت به سیمان است.

### ۳-۱-۲- قیف V

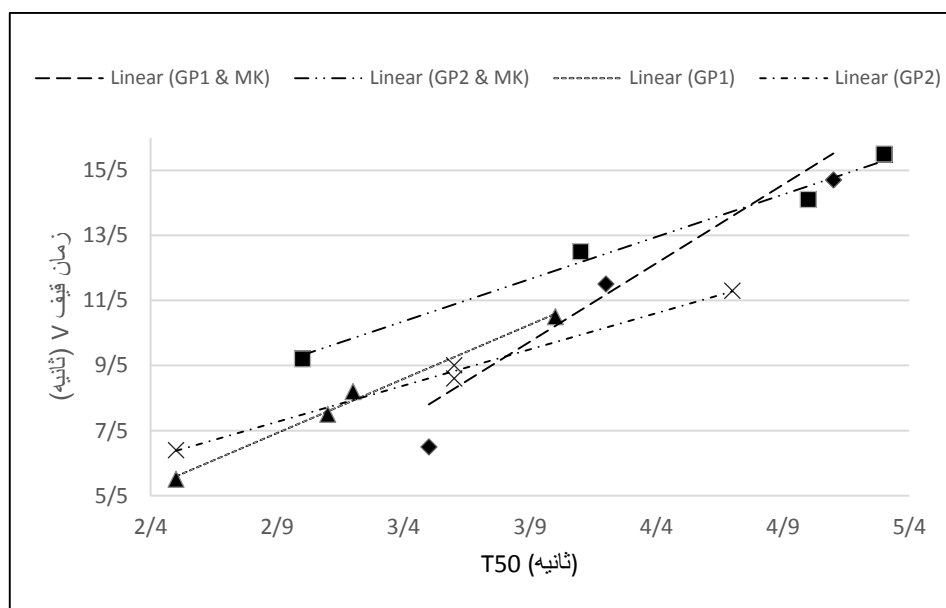
مقادیر زمان قیف V برای همه نمونه‌ها در بازه ۶ تا ۱۶ قرار گرفته است (جدول ۴). همانطور که در شکل ۲ قابل ملاحظه است زمان قیف V و لزجت با افزایش درصد پودر شیشه یا متاکائولن نسبت به نمونه کنترل بیشتر می‌شود، که منطبق بر نتایج بدست آمده در دیگر پژوهش‌ها است [۱۲ و ۱۸]. این افزایش در نمونه‌های حاوی پودر شیشه G2 بیشتر از نمونه‌های حاوی پودر شیشه G1 است. علاوه بر این استفاده از متاکائولن، زمان قیف V را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. به بیان دیگر با افزایش میزان استفاده از پودر شیشه و متاکائولن و یا ریزتر شدن پودر شیشه به علت افزایش سطح مخصوص مخلوط تراکمی افزایش یافته و زمان قیف V بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، اگرچه جریان اسلامپ برای نمونه‌های G11 و Ctrl مساوی است، با این وجود زمان قیف V برای G11 کمتر می‌باشد. علاوه بر این جریان اسلامپ برای نمونه‌های Ctrl و G1MK4 تقریباً یکسان و برای نمونه‌های Ctrl و G2MK2 یکسان است؛ اما زمان قیف V برای نمونه‌های G1MK4 و G2MK2 تقریباً دو برابر نمونه Ctrl است. به عبارت دیگر جریان اسلامپ به تنهایی نمی‌تواند نشان دهنده خواص بتن تازه باشد.

### ۳-۱-۳- T50

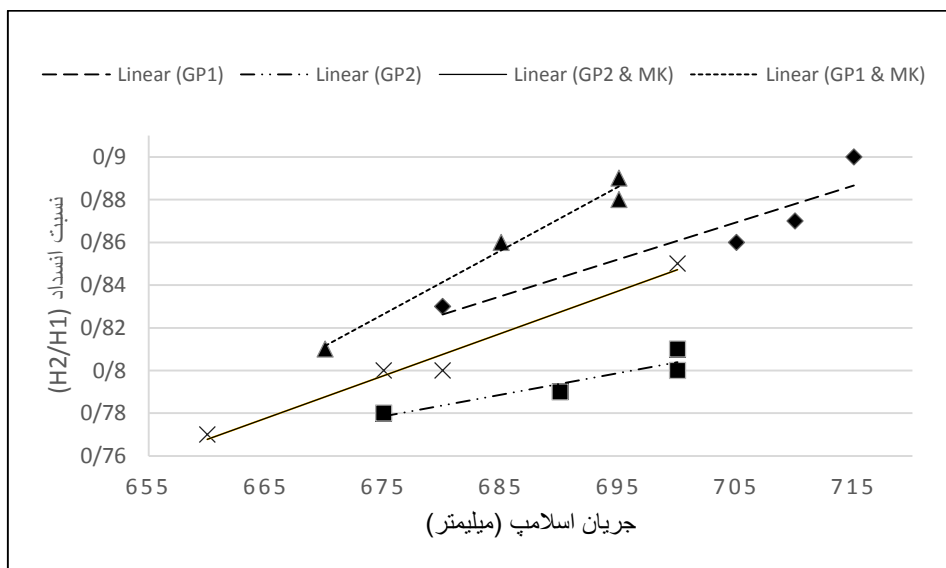
نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد پودر شیشه و متاکائولن، T50 افزایش می‌یابد. هرچقدر پودر شیشه ریزتر باشد T50 بیشتر خواهد بود. به علاوه بر اساس نتایج تأثیر متاکائولن در افزایش مقدار T50 بیشتر از میزان ریزی پودر شیشه است. آزمایش T50 و قیف V هر دو بیان کننده لزجت بتن هستند و برقراری یک رابطه مناسب بین نتایج آن‌ها بیان کننده هماهنگی این دو آزمایش است. نتایج یک مطالعه [19] که به بررسی خواص بتن خود تراکم حاوی پودر



شکل ۲- زمان قیف V در طرح‌های اختلاط‌های بتن خود تراکم حاوی پودر شیشه و متاکائولن



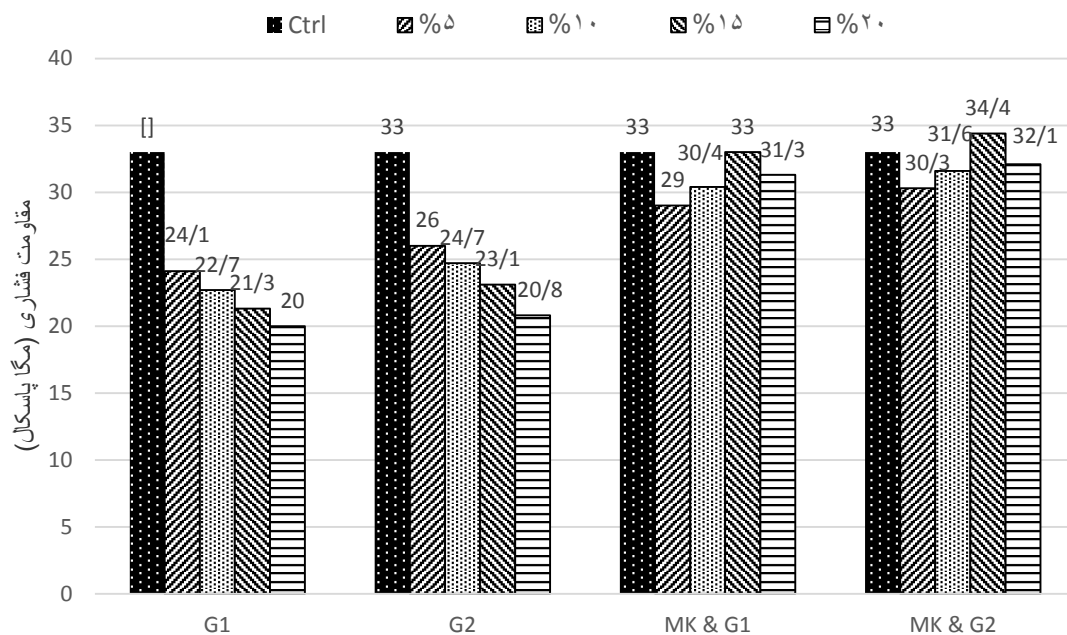
شکل ۳- رابطه بین زمان T50 و زمان قیف V در بتن خود تراکم



شکل ۴- رابطه بین جریان اسلامپ و نسبت انسداد در بتن خود تراکم

جدول ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم (مگا پاسکال)

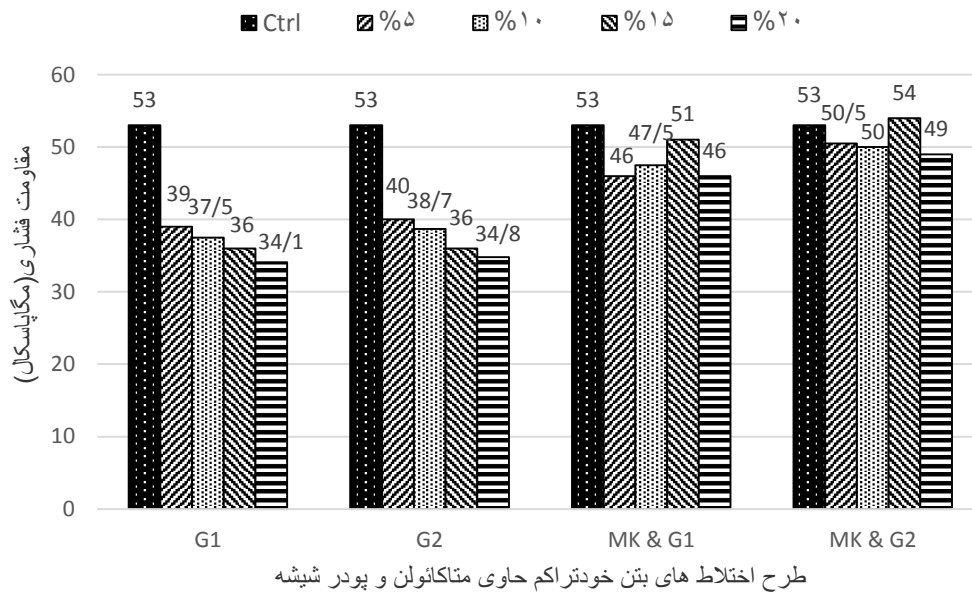
طرح اختلاط	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۱۴	روزه ۲۸	روزه ۵۶	مقایسه ۲۸ روزه به نمونه مرجع
Ctrl	۲۰	۳۳	۳۵	۴۵	۵۳	۱
G11	۱۵/۳	۲۴/۱	۲۵	۳۶/۱	۳۹	۰/۸۰۲
G12	۱۴/۱	۲۲/۷	۲۳/۲	۳۵/۸	۳۷/۵	۰/۷۹۵
G13	۱۲/۵	۲۱/۳	۲۲/۷	۳۵/۷	۳۶	۰/۷۹۳
G14	۱۲/۴	۲۰	۲۱	۳۰	۳۴/۱	۰/۶۷
G21	۱۵/۸	۲۶	۲۷	۳۸/۲	۴۰	۰/۸۴۸
G22	۱۴/۷	۲۴/۷	۲۵/۴	۳۷	۳۸/۷	۰/۸۲۲
G23	۱۳/۲	۲۳/۱	۲۴/۱	۳۵/۶	۳۶	۰/۷۹۵
G24	۱۱/۸	۲۰/۸	۲۲	۳۱	۳۴/۸	۰/۶۹
G1MK1	۱۸/۲	۲۹	۳۴	۳۹	۴۶	۰/۸۶۷
G1MK2	۱۹	۳۰/۴	۳۵	۳۵/۹	۴۷/۵	۰/۷۹۸
G1MK3	۲۰/۶	۳۳	۳۸/۵	۴۲/۷	۵۱	۰/۹۴۸
G1MK4	۱۹	۳۱/۳	۳۵/۵	۴۰/۸	۴۶	۰/۹۰۱
G2MK1	۱۹/۱	۳۰/۳	۳۶	۴۰	۵۰/۵	۰/۸۸۹
G2MK2	۲۰	۳۱/۶	۳۶/۶	۴۰/۵	۵۰	۰/۹
G2MK3	۲۱/۱	۳۴/۴	۴۰	۴۲	۵۴	۰/۹۳۳
G2MK4	۲۰/۲	۳۲/۱	۳۹	۴۰	۴۹	۰/۸۸۹



طرح اختلاط های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و پودر شیشه

شکل ۵- مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه بتن خودتراکم





شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری ۵۶ روزه بتن خودتراکم

تأثیرگذار رابطه‌ای مناسب برقرار شود. در این مطالعه از روش رگرسیون چند متغیره خطی<sup>۱</sup> و غیر خطی<sup>۲</sup> در محیط نرم افزار SPSS21، به منظور دستیابی به رابطه‌ای مناسب بین درصد متاکائولن، درصد پودر شیشه G1، درصد پودر شیشه G2 و زمان انجام آزمایش مقاومت فشاری به عنوان متغیرهای ورودی و مقاومت فشاری به عنوان متغیر خروجی استفاده شده است. بدین منظور از ۸۵ حالت ممکن برای متغیرهای فوق‌الذکر که در همه آن‌ها نسبت آب به سیمان ثابت و برابر ۰/۳۲ است، ۴۳ حالت به صورت تصادفی برای آموزش مدل‌ها و ۴۲ حالت دیگر برای ارزیابی صحت مدل‌های استخراج شده استفاده شد. چندین رابطه مورد بررسی قرار گرفت و بهترین آن‌ها بر اساس میزان ضریب همبستگی  $R^2$  انتخاب شد. در جدول ۶ جزئیات متغیرهای ورودی و مدل‌های استخراج شده ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل‌های ارائه شده دارای ضرایب همبستگی نزدیک به ۱ و خطای نسبی ناچیز هستند. این موضوع نشان دهنده آن است که پارامترهای مناسبی به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده و علاوه بر آن تغییرات این پارامترها با روندی منظم باعث تغییر مقاومت فشاری می‌شود. در شکل‌های ۷ و ۸ توانایی مدل‌های ارائه شده در ارزیابی میزان مقاومت فشاری به صورت نمودار ارائه شده است.

با استفاده هم‌زمان از پودر شیشه و متاکائولن مقاومت فشاری در کل افزایش می‌یابد. در واقع متاکائولن به دلیل سطح مخصوص بیشتر نسبت به پودر شیشه و سیمان، باعث افزایش چسبندگی خمیر سیمان شده و تا حد زیادی تأثیر پودر شیشه در کاهش مقاومت فشاری را از بین می‌برد. مطالعات دیگر نتایج بدست آمده را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که استفاده از پودر شیشه باعث کاهش مقاومت فشاری در بتن معمولی [3] و بتن خودتراکم [18] شده و افزودن متاکائولن به بتن خود تراکم باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۱۲ و ۱۳ و ۲۱]. با توجه به روند واکنش شیمیایی پودر شیشه استفاده بیش از حد آن موجب کاهش شدید مقاومت فشاری بتن و احتمال سرطان در بتن را افزایش می‌دهد. در ادامه با استفاده از روابط ریاضی، تأثیر پودر شیشه، متاکائولن و سن بتن بر میزان مقاومت فشاری بتن خود تراکم ارزیابی می‌شود.

### ۳-۲-۲- تخمین مقاومت فشاری

میزان مقاومت فشاری بتن خودتراکم تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد. با استفاده از روش رگرسیون خطی می‌توان بر اساس هر یک از عوامل تأثیرگذار، مقاومت فشاری بتن را ارزیابی نمود. لیکن در صورتی که بخواهیم میزان مقاومت فشاری بتن را بر اساس همه عوامل تأثیرگذار به دست آوریم، باید بین همه متغیرهای

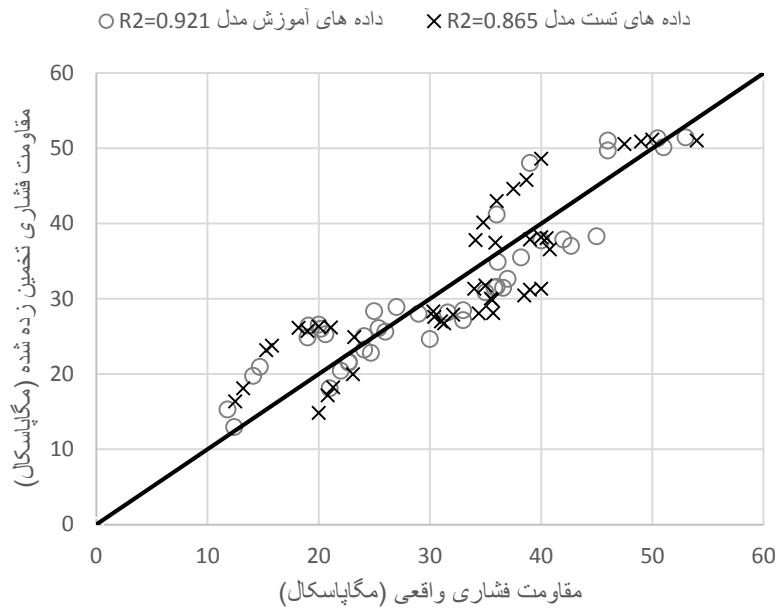
<sup>2</sup>- Nonlinear multiple regression technique (NLMRT)

<sup>1</sup>- linear multiple regression technique (LMRT)

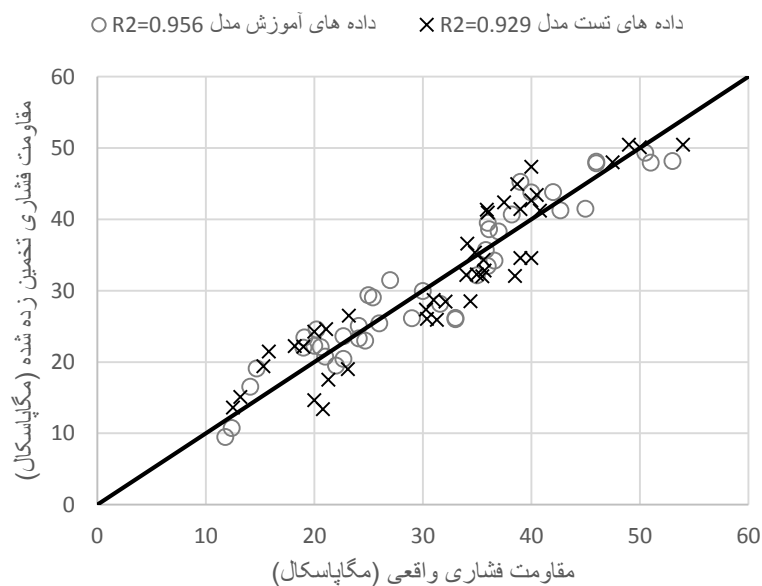
جدول ۶- نتایج مدل سازی مقاومت فشاری بتن خودتراکم

روش	مدل	استفاده داده ها در مدل	ضرب همبستگی ( $R^2$ )	متوسط خطای نسبی	بیشینه خطای نسبی
رگرسیون خطی	$CS=25/178+0/509MK-0/682CG-0/565FG+0/469T$	آموزش	0/921	0	6/68
رگرسیون غیر خطی		تست	0/865	0/04	8/67
رگرسیون خطی	$CS=19/131+0/549MK-0/577CG+1/078T-0/032FG^2-0/010T^2$	آموزش	0/956	0	7/04
رگرسیون غیر خطی		تست	0/929	0/32	7/29

CS: مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال  
 MK: درصد متاکائولن بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۳  
 CG: درصد پودر شیشه G1 بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۳  
 FG: درصد پودر شیشه G2 بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۳  
 T: زمان انجام آزمایش مقاومت فشاری بر حسب روز بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۵



شکل ۷- مقایسه مقاومت فشاری واقعی و تخمین زده شده توسط روش رگرسیون چند متغیره خطی



شکل ۸- مقایسه مقاومت فشاری واقعی و تخمین زده شده توسط روش رگرسیون چند متغیره غیر خطی

نشان داده شده است در نمونه‌هایی که از پودر شیشه به تنهایی استفاده شده است، مقاومت ۲۸ روزه کششی با افزایش درصد پودر شیشه کمتر می‌شود. این مطلب مطابق با نتایج بدست آمده از تحقیقی دیگر در این زمینه می‌باشد [18].

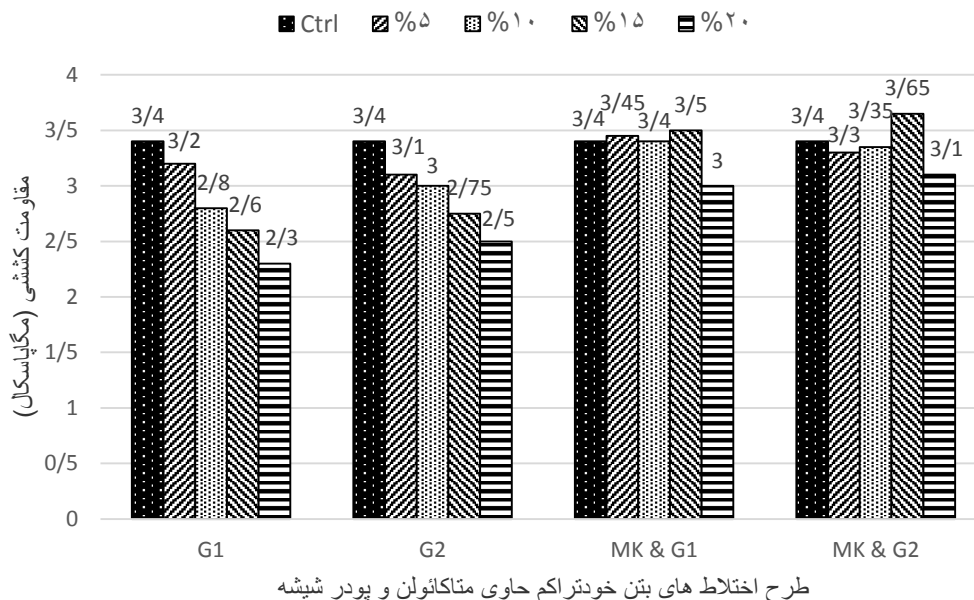
جدول ۷- مقاومت کششی بتن خودتراکم ۲۸ روزه

نام اختلاط	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	نام اختلاط	مقاومت کششی (مگا پاسکال)
Ctrl	۳/۴	G1MK1	۳/۴۵
G11	۳/۲	G1MK2	۳/۴
G12	۲/۸	G1MK3	۳/۵
G13	۲/۶	G1MK4	۳
G14	۲/۳	G2MK1	۳/۳
G21	۳/۱	G2MK2	۳/۳۵
G22	۳	G2MK3	۳/۶۵
G23	۲/۷۵	G2MK4	۳/۱
G24	۲/۵		

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مقادیر ارزیابی شده برای مقاومت فشاری توسط مدل غیر خطی نسبت به مقادیر ارزیابی شده توسط مدل خطی (شکل ۷) به خط  $Y=X$  نزدیک تر بوده و نتایج واقعی تری را تخمین می‌زند. به بیان دیگر در واقعیت مقاومت فشاری نسبت به پارامتر زمان و پودر شیشه G2 به صورت خطی تغییر نکرده و رابطه پیچیده تری دارد. علاوه بر این در مدل غیر خطی ضریب همبستگی برای نمونه‌های آموزش مدل و نمونه‌های تست مدل تفاوت چندانی ندارد. در نهایت مدل دوم در جدول ۶ برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و پودر شیشه پیشنهاد می‌شود.

### ۳-۲-۳ - مقاومت کششی

در جدول ۷ نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی ارائه شده است. مقاومت کششی برای پیش‌بینی آغاز ترک خوردگی اعضای بتنی در معرض بارهای خارجی حائز اهمیت است. از جمله عواملی که بر مقاومت کششی بتن مؤثر است، مقاومت خمیر سیمان و چسبندگی بین خمیر و سنگ‌دانه است. همان‌طور که در شکل ۹



طرح اختلاط های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و پودر شیشه

شکل ۹- مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن خود تراکم

حضور همزمان متاکائولن و پودر شیشه مقاومت کششی بهبود می‌یابد، که این به دلیل چسبندگی بهتر متاکائولن در خمیر سیمان است. نتایج دیگر تحقیقات هم نشان‌دهنده افزایش مقاومت کششی ناشی از حضور متاکائولن در بتن خود تراکم [13] و یا بتن معمولی

علاوه بر این همانند مقاومت فشاری، نمونه‌های حاوی پودر شیشه G1 مقادیر مقاومت کششی کمتری را نشان می‌دهند، که این مسأله به دلیل کم بودن مقاومت خمیر سیمان و چسبندگی بین خمیر و سنگ‌دانه‌های بتن در حالت استفاده از پودر شیشه درشت تر است. با

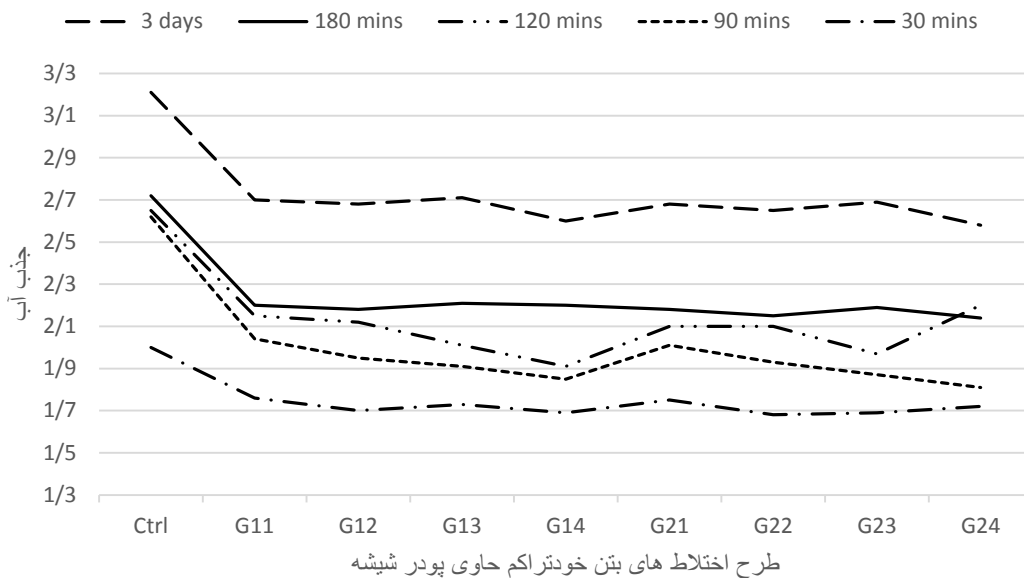
است [14]. نکته قابل توجه این است که هنگامی که درصد جای-گزینی متاکائولن و پودر شیشه از ۱۵ درصد (نمونه G2MK3) به ۲۰ درصد (نمونه G2MK4) افزایش می‌یابد مقاومت فشاری و کششی کاهش می‌یابد. این مسأله بیان می‌کند که استفاده از پرکننده جای‌گزین (متاکائولن و پودر شیشه) تا حداکثر ۱۵ درصد می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی بتن شود. بعد از این حد، اگرچه پودر شیشه ضایعاتی بیشتری را می‌توان مصرف کرد؛ اما به این دلیل که سطح مخصوص مواد سیمانی با افزایش درصد پودر شیشه کمتر می‌شود باید کاهش مقاومت در بتن را پذیرفت.

### ۳-۲-۴- جذب آب

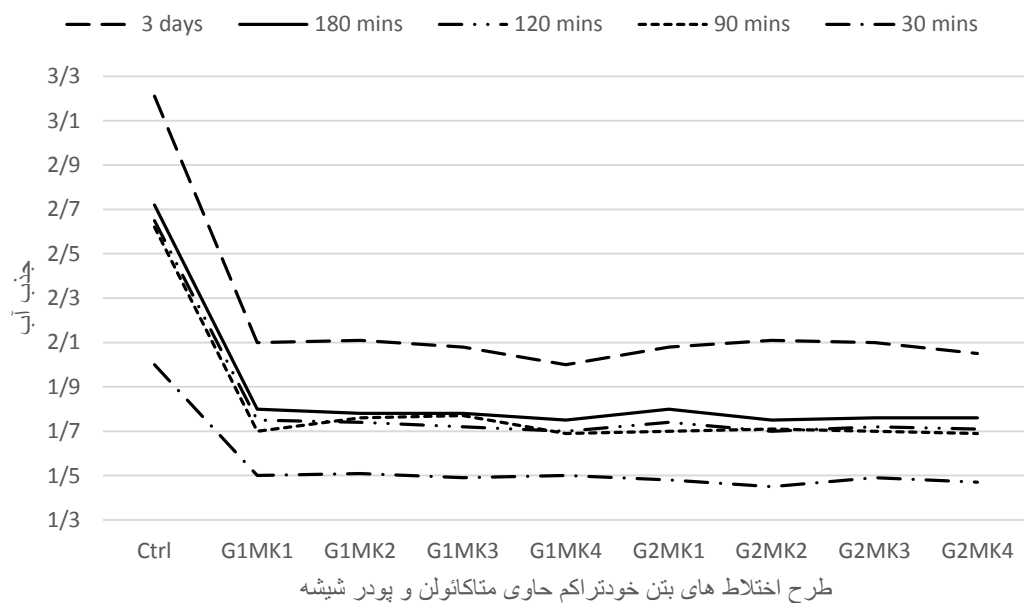
جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم ارائه شده در این تحقیق طبق استاندارد ASTM C140-01 انجام گرفته است. برای به دست آوردن جذب آب مورد نیاز و روند حرکتی آن به صورت دقیق، هر نمونه در ۷ مرحله مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش‌های جذب آب در زمان‌های ۳ ساعت و ۳ روز بر اساس EFNARC [16] لازم بوده و بقیه برای دست‌یابی به روند جذب آب در زمان‌های متفاوت انجام شده است. جدول ۸ نتایج بدست آمده از آزمایش جذب آب را ارائه می‌کند. جذب آب بالا می‌تواند بر دوام بتن تأثیر-گذار باشد؛ چرا که بیشتر مواد خورنده توسط آب به بتن راه می‌یابند.

جدول ۸- نتایج آزمایش جذب آب بتن خودتراکم بر حسب درصد

نام اختلاط	۳۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۹۰ دقیقه	۱۲۰ دقیقه	۱۵۰ دقیقه	۱۸۰ دقیقه	۳ روز	مقایسه نسبت به مرجع
Ctrl	۲	۲/۲۸	۲/۶۲	۲/۶۲	۲/۶۵	۲/۷۲	۳/۲۱	۱
G11	۱/۷۶	۲/۰۵	۲/۰۴	۲/۱۵	۲/۲۵	۲/۲	۲/۷	۰/۸۴۱
G12	۱/۷	۱/۹	۱/۹۵	۲/۱۲	۲/۰۹	۲/۱۸	۲/۶۸	۰/۸۳۴
G13	۱/۷۳	۱/۸۷	۱/۹۱	۲/۰۱	۲/۰۴	۲/۲۱	۲/۷۱	۰/۸۴۴
G14	۱/۶۹	۱/۷۳	۱/۸۵	۱/۹۱	۲/۰۱	۲/۲	۲/۶	۰/۸۱
G21	۱/۷۵	۱/۹۸	۲/۰۱	۲/۱	۲/۲۳	۲/۱۸	۲/۶۸	۰/۸۳۵
G22	۱/۶۸	۱/۸۳	۱/۹۳	۲/۱	۲/۰۶	۲/۱۵	۲/۶۵	۰/۸۲۶
G23	۱/۶۹	۱/۸۱	۱/۸۷	۱/۹۷	۲	۲/۱۹	۲/۶۹	۰/۸۳۸
G24	۱/۷۲	۱/۷۳	۱/۸۱	۲/۲	۱/۹۹	۲/۱۴	۲/۵۸	۰/۸۰۴
G1MK1	۱/۵	۱/۷۱	۱/۷	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۸	۲/۱	۰/۶۵۴
G1MK2	۱/۵۱	۱/۶۹	۱/۷۶	۱/۷۴	۱/۷۶	۱/۷۸	۲/۱۱	۰/۶۵۷
G1MK3	۱/۴۹	۱/۶۵	۱/۷۷	۱/۷۲	۱/۷۷	۱/۷۸	۲/۰۸	۰/۶۴۸
G1MK4	۱/۵	۱/۶۵	۱/۶۹	۱/۷	۱/۷۵	۱/۷۵	۲	۰/۶۲۳
G2MK1	۱/۴۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷۴	۱/۷۶	۱/۸	۲/۰۸	۰/۶۴۸
G2MK2	۱/۴۵	۱/۷	۱/۷۱	۱/۷	۱/۷۴	۱/۷۵	۲/۱۱	۰/۶۵۷
G2MK3	۱/۴۹	۱/۶۹	۱/۷	۱/۷۲	۱/۷۴	۱/۷۶	۲/۱	۰/۶۵۴
G2MK4	۱/۴۷	۱/۶۸	۱/۶۹	۱/۷۱	۱/۷۳	۱/۷۶	۲/۰۵	۰/۶۳۹



شکل ۱۰- روند جذب آب بتن خودتراکم حاوی پودر شیشه



شکل ۱۱- روند جذب آب بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و پودر شیشه

#### ۴- نتیجه گیری

- زمان T50 با افزایش درصد متاکائولن و پودر شیشه افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج تأثیر متاکائولن در افزایش زمان T50 بیشتر از اندازه ذرات پودر شیشه است.  
- اکثر نمونه‌ها مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه کنترل دارند. استفاده از پودر شیشه مقاومت فشاری را نسبت به نمونه کنترل کاهش می‌دهد. با افزایش درصد پودر شیشه، مقاومت فشاری کمتر می‌شود. استفاده از متاکائولن و افزایش آن تا ۱۵٪ مقاومت فشاری را نسبت به نمونه‌های حاوی پودر شیشه افزایش می‌دهد. نتایج

- با افزایش درصد مواد پوزولانی جای‌گزین (متاکائولن یا پودر شیشه) در هریک از چهار گروه اصلی طرح اختلاط (G1، G2، G3 و G4) میزان جریان اسلامپ بیشتر می‌شود. همه طرح اختلاط‌ها در کلاس SF2 قرار می‌گیرد.  
- با افزایش درصد متاکائولن و یا پودر شیشه، زمان قیف V افزایش می‌یابد؛ علاوه بر این نمونه‌های حاوی پودر شیشه G2 لزجت بیشتری را نشان می‌دهد.

and cement replacement,” *Construction and Building Materials*. 22, 713-720, 2008.

[4]. Shi, C., Zheng, K., “A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete,” *Resources, Conservation and Recycling*. 52, 234-247, 2007.

[5]. Wang, H.Y., Huang, W.L. “A study on the properties of fresh self-consolidating glass concrete (SCGC),” *Construction and Building Materials*. 24, 619-624, 2010.

[6]. Alyamaç, K.E., Ince, R. “A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders,” *Construction and Building Materials*. 23, 1201-1210, 2009.

[7]. Kou, S.C., Poon, C.S. “Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate,” *Cement & Concrete Composites*. 31, 107-113, 2009.

[8]. Nassar, R., Soroushian, P. “Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement,” *Construction and Building Materials*. 29, 368-377, 2012.

[9]. Shi, C., Wu, Y. “Mixture Proportioning and Properties of Self-Consolidating Lightweight Concrete Containing Glass Powder,” *ACI MATERIALS JOURNAL*. 102, 355-363, 2005.

[10]. Aiswarya, S., Prince, A.G., Dilip, C. “A REVIEW ON USE OF METAKAOLIN IN CONCRETE,” *Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*. 3, 592-597, 2013.

[11]. Mahajan, S., Singh, D. “Fresh and Hardened Properties of Self Compacting Concrete Incorporating Different Binder Materials,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3, 689-693, 2013.

[12]. Hassan, A.A.A., Lachemi M., Hossain, K.M.A. “Effect of Metakaolin on the Rheology of Self-Consolidating Concrete,” *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, RILEM Bookseries*. 1, 103-112, 2010.

[13]. Madandoust, R., Mousavi, S.Y. “Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin,” *Construction and Building Materials*. 35, 752-760. 2012.

[14]. Guneyisi, E., Gesoglu, M., Mermerdas, K. “Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin,” *Materials and Structures*. 41, 937-949, 2008.

[15]. Dhinakaran, G., Thilgavathi, S., Venkataramana, J. “Compressive Strength and Chloride Resistance of Metakaolin Concrete,” *KSCE Journal of Civil Engineering*. 16, 1209-1217, 2012.

تحقیقات دیگر هم نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری در صورت استفاده از متاکائولن و کاهش مقاومت فشاری در صورت استفاده از پودر شیشه در بتن خود تراکم است.

- متغیرهای اصلی در ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و پودر شیشه عبارت است از میزان متاکائولن، میزان پودر شیشه و زمان انجام آزمایش فشاری.

- تغییرات مقاومت فشاری نسبت به پودر شیشه G1 و متاکائولن، خطی و نسبت به پودر شیشه G2 و زمان، غیرخطی است.

- روش رگرسیون چندمتغیره غیر خطی نسبت به رگرسیون چندمتغیره خطی ارزیابی بهتری از مقاومت فشاری بتن خودتراکم ارائه داده و با دقت خوبی می توان با استفاده از این مدل مقاومت فشاری را بدست آورد.

- مشابه نتایج به دست آمده برای آزمایش فشاری، مقاومت کششی در صورت استفاده از پودر شیشه کاهش و در صورت استفاده از متاکائولن افزایش می یابد.

- به طور کلی با افزایش درصد پودر شیشه و متاکائولن، جذب آب کاهش می یابد، که منطبق بر نتایج دیگر تحقیقات است. این کاهش با افزایش سن بتن چشمگیرتر است. با تغییر طرح اختلاط نمونه ها از G2 به G3، کاهش قابل ملاحظه ای در میزان جذب آب مشاهده می شود. علاوه بر این تغییرات جذب آب در گروه G3 و G4 ناچیز است.

- استفاده از ۱۵٪ مواد پوزولانی جایگزین (۷/۵٪ متاکائولن و ۷/۵٪ پودر شیشه) به خصوص در حالت استفاده از پودر شیشه G2 بیشترین مقاومت فشاری و کششی را نسبت به نمونه کنترل نشان می دهد؛ بنابراین این درصد به عنوان بهترین درصد جایگزین معرفی می شود.

## ۵- مراجع

- [1] Ling, T.C., Poon, C.S., Wong, H.W. “Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kon,” *Resources, Conservation and Recycling*. 70, 25-31, 2013.
- [2]. Batayneh, M., Marie, I., Asi, I. “Use of selected waste materials in concrete mixes,” *Waste Management*. 27, 1870-1876, 2007.
- [3]. Taha, B., Nounu, Gh. “Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand

- [16]. EFNARC. Specification and guideline for self-compacting concrete. February 2002.
- [17]. EFNARC. The European Guidelines for self-compacting concrete specification, Production and use. May 2005.
- [18]. Vanjare, M.B., Mahure, Sh.H. "Experimental Investigation on Self Compacting Concrete Using Glass Powder," International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2, 1488-1492, 2012
- [19]. Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B. "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete," Building and Environment. 42, 1795-1802, 2007.
- [20]. Hwang, S.D., Khayat, K.H., Bonneau, O. "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications," ACI Materials Journal. 103, 121-129, 2006.
- [21]. Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Skalinski, B., Cerny, R. " Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag," Construction and Building Materials. 25, 1325–1331, 2011.

## The Effect of Glass Powder and Metakaolin on the Self-Compacting Concrete (SCC) Properties

Mohammad Abbasi Rasht Abadi \*

Ph.D. Student, Civil Eng. Dept., University of Semnan

Malek Muhammad Ranjbar

Assistant Professor, Department of civil engineering , University of Guilan

Rahmat Madandoust

Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan

### Abstract

Glass powder and Metakaolin are suitable alternative for part of cement in concrete. The use of waste glass powder in concrete is economic and reduces environmental impacts resulting from the release of recycled glass in nature. On the other side, Metakaolin because of pozzolanic features can increase the resistance of concrete. In this study, by simultaneous use of these two substances in the production of self-compacting concrete, fresh and hardened concrete properties are evaluated. For this purpose, Seventeen mixtures with various percentages of glass powder and Metakaolin (5%, 10%, 15% and 20%) and constant Water/cement ratio equal to 0.32 were made. Fresh concrete tests, including slump flow, T50, L Box and V-funnel and also hardened concrete tests, including compressive, tensile and water absorption for all of SCC mixtures was performed. Results show that by increasing the amount of glass powder, slump flow and V-funnel time increases but compressive and tensile strength and initial water absorption decreases. By adding metakaolin and increase it to 15%, compressive and tensile strength increases.

**Keywords:** SCC, Glass powder, Metakaolin, Concrete Properties.

---

\* Corresponding Author: mohammad\_civil\_1384@yahoo.com