



## تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه بر میزان جداسدگی و مقاومت در بتن خودتراکم

ابراهیم اکرمی<sup>۱</sup>، جواد مروتی<sup>۲</sup>، مصطفی رستمی<sup>۳</sup>، مریم مغنی نژاد<sup>۳</sup>، علیرضا طلوع صابر<sup>۴</sup>

1- رئیس هیات مدیره شرکت بنیان بتن مشهد

2- مدیر تحقیق و توسعه شرکت بنیان بتن مشهد

3- کارشناس ارشد واحد تحقیق و توسعه شرکت بنیان بتن مشهد

4- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران

m\_rostami\_engi@yahoo.com

### خلاصه

عموماً جهت تامین خواص بهینه مقاومت، دوام، جمع شدگی و غیره باید بزرگترین حداکثر اندازه سنگدانه را در مخلوط‌های بتنی به کار برد، زیرا سنگدانه درشت‌تر امکان استفاده از حداقل مقدار آب واحد را فراهم می‌سازد. از آنجا که حدود  $\frac{3}{4}$  حجم بتن را سنگدانه تشکیل می‌دهد لذا کیفیت سنگدانه‌ها، دانه بندی و حداکثر اندازه آن‌ها تأثیر زیادی بر مشخصات رفتار شناسی بتن تازه (از جمله جداسدگی) و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده دارد. در این تحقیق با ثابت نگه داشتن طرح اختلاط برای بتن خودتراکم، با تغییر حداکثر اندازه سنگدانه از 9/5 تا 32 میلیمتر، نقش افزایش بعد دانه‌های سنگی در بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصله بتن خودتراکم با بزرگترین بعد 12/5 و 16 میلیمتر از لحاظ خواص رئولوژی بهترین نتیجه را دارا می‌باشند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، جداسدگی، مقاومت، سنگدانه، رفتارشناسی

### 1. مقدمه

بتن یکی از رایج‌ترین و ارزان‌ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. بتن خودتراکم که اولین بار در اواخر دهه 80 توسط Okamura ساخته شد، گام بلندی در استفاده از بتن با مشخصات رئولوژی و مکانیکی مناسب با شرایط خاص محسوب می‌گردد. این نوع بتن مشکلات اجرایی در موقعیت‌های با تراکم آرماتور بالا و همچنین در مقاطعی که عمل ویبره با مشکلات زیادی همراه است را از بین برده و در فراگیرتر شدن استفاده از این مصالح در صنعت ساخت نقش عمده‌ای داشته است [1].

از آنجا که حداقل هفتاد و پنج درصد حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند بنابراین کیفیت این مواد از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد. خواص سنگدانه علاوه بر مقاومت بتن به میزان چسبندگی، دوام و عملکرد ساختمانی بتن تأثیر خواهد گذاشت. سنگدانه از سیمان ارزان‌تر بوده و بنابراین استفاده از آن اقتصادی است. بنابراین از حیث اقتصادی لازم است مقدار سنگدانه در مخلوط را در حداکثر مقدار ممکن و مقدار سیمان را در حداقل مقدار ممکن تعیین نمود. ولی اقتصاد تنها دلیل به کار بردن سنگدانه در بتن نمی‌باشد بلکه کاربرد آن‌ها امتیازات فنی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌نماید و به بتن ثبات حجمی و دوام بیشتری از خمیر سیمان خالص می‌دهد. [1].

در بتن خودتراکم معمولاً از مقدار درشت‌دانه کمتری نسبت به بتن عادی استفاده می‌شود. همچنین حداکثر اندازه درشت‌دانه نیز کمتر است. هرچند بتن خودتراکم را می‌توان با سنگدانه‌ها و دانه بندی‌های مختلف تهیه کرد، اما بهینه کردن مشخصات سنگدانه می‌تواند باعث بهبود مشخصات روانی و کاهش مصرف مواد سیمانی، آب و افزودنی‌های شیمیایی شود. انتخاب منبع سنگدانه در بتن خودتراکم، نقش کلیدی دارد و

سنگدانه‌ها باید از لحاظ شکل، بافت سطحی، تیز گوشگی و دانه بندی بررسی شوند. می‌توان گفت که بتن خودتراکم مخلوط معلق از سنگدانه‌ها در خمیر است (شکل 1) بنابراین سنگدانه‌ها، یکی از اجزای اصلی و تاثیرگذار بر مشخصات بتن خودتراکم محسوب می‌شوند. [1]

با توجه به این که بتن تازه از دو فاز سنگدانه و خمیر سیمان تشکیل شده است و فیلر نقش شایان توجهی در قابلیت پایداری و قابلیت عبور در بتن خودتراکم را ایفا می‌کند، از این رو میزان و اندازه و همچنین نوع فیلر مصرفی حائز اهمیت می‌باشد. [2] از آنجا که سنگدانه بخش بزرگی از بتن را شامل می‌شود، در کارایی بتن خودتراکم نقش مهمی دارد. بنابراین شناخت نحوه تاثیر مشخصات سنگدانه بر رفتار بتن تازه خودتراکم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. [3]

در بتن خودتراکم همواره با محدودیت حداکثر اندازه درشت دانه مواجه بوده‌ایم. بزرگترین اندازه سنگدانه درشت مصرف شده در بتن از جنبه‌های اقتصادی حائز اهمیت است و معمولاً برای سنگدانه‌های کوچکتر، آب و سیمان بیشتری نسبت به سنگدانه‌های بزرگتر مورد نیاز است. [4] بنابراین در این تحقیق محدودیت فوق مورد بررسی قرار گرفته است.

علی‌رغم اینکه تحقیقات زیادی در مورد تاثیرات سنگدانه بر مشخصات بتن معمولی صورت گرفته است، اطلاعات کمی در مورد نقش سنگدانه در بتن خودتراکم وجود دارد. یکی از خصوصیات تاثیرگذار سنگدانه بر روانی و پایداری بتن تازه خودتراکم حداکثر اندازه سنگدانه می‌باشد. برای کنترل جدایش می‌توان از افزودنی‌های شیمیایی استفاده کرد که این امر به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش هزینه ساخت همراه است. بنابراین انتخاب حداکثر اندازه مناسب سنگدانه، می‌تواند علاوه بر افزایش کارایی هزینه را نیز کاهش دهد. شکرچی زاده و همکاران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش حداکثر اندازه سنگدانه، روانی مخلوط افزایش یافته و متعاقباً تمایل مخلوط به ناپایداری بیشتر می‌شود. از طرف دیگر استفاده از سنگدانه‌های با حداکثر اندازه کوچکتر باعث کاهش کارایی بتن تازه خودتراکم می‌شود. آیتسین استفاده از ماسه‌های درشت با مدول نرمی بین 2/7 و 3 را به منظور افزایش کارایی پیشنهاد می‌کند. [3]

## 2. برنامه آزمایشگاهی

هدف از این مقاله بررسی تاثیر حداکثر اندازه سنگدانه در ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده خودتراکم می‌باشد. در این تحقیق از حداکثر اندازه سنگدانه با بعد 9/5، 12/5، 16، 19، 25 و 32 میلیمتر استفاده شده است. با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه تغییرات لازم جهت ایجاد یک دانه بندی پیوسته در محدوده شن با توجه به حدود استاندارد ASTM لحاظ شده است. ابعاد قالب‌های مکعبی استفاده شده برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های 15×15×15 سانتی‌متر در نظر گرفته شده و مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین 7، 28 و 90 روز تعیین شده است.

برای ارزیابی مشخصات فیزیکی-مکانیکی بتن‌ها، پس از ساخت بتن آزمایش‌های مربوط به بتن تازه نظیر اسلامپ، قیف V، جعبه L و GTM صورت گرفته شده است. طرح اختلاط استفاده شده برای تمامی طرح‌ها یکسان بوده و در جدول (1) نشان داده شده است.

جدول 1- طرح نسبت مصالح طرح اختلاط

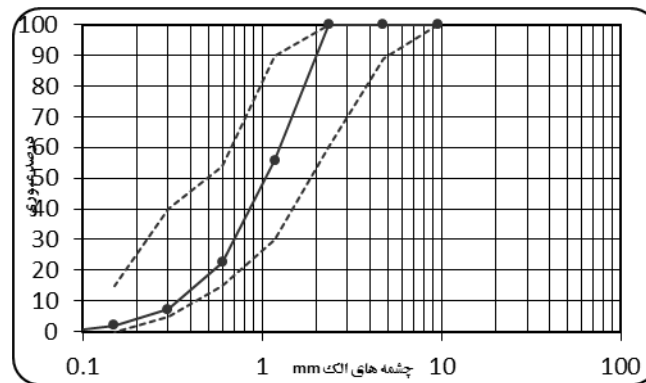
سیمان	$\frac{w}{c}$	٪ فوق روان کننده	ماسه	شن	پودرسنگ
500	0/38	1/4	1100	350	254

جدول 2- نام گذاری طرح اختلاط‌ها

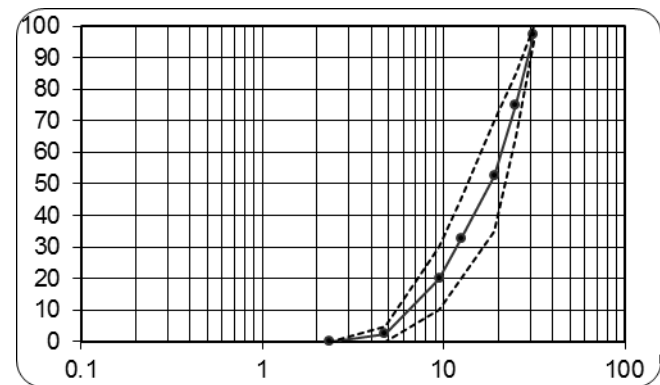
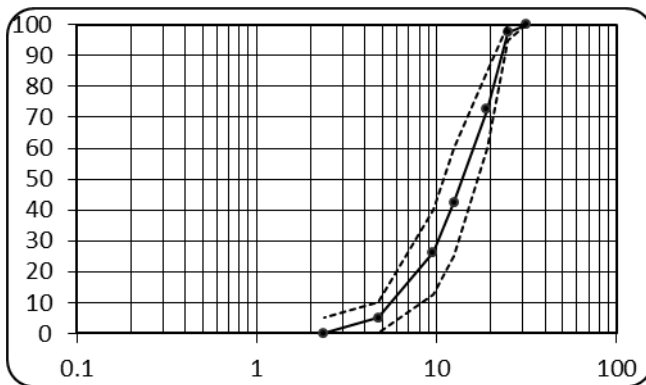
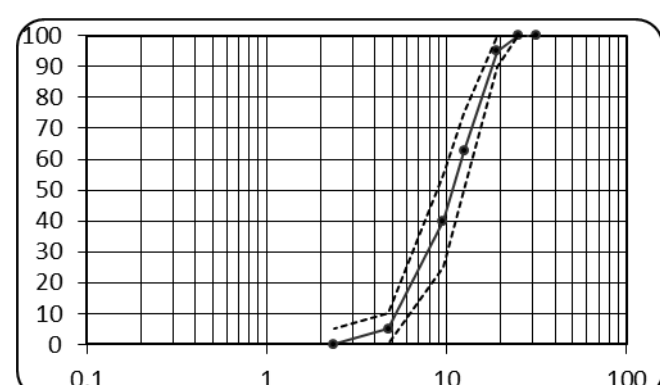
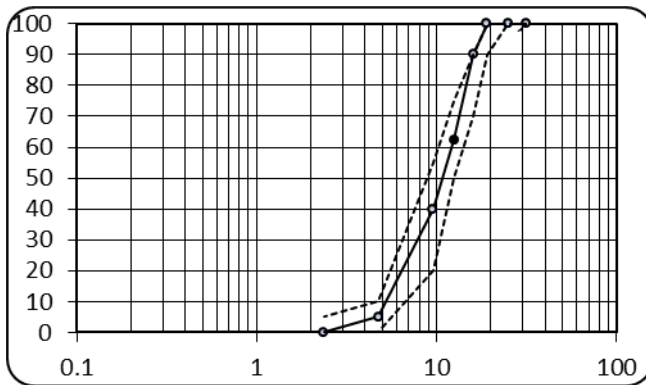
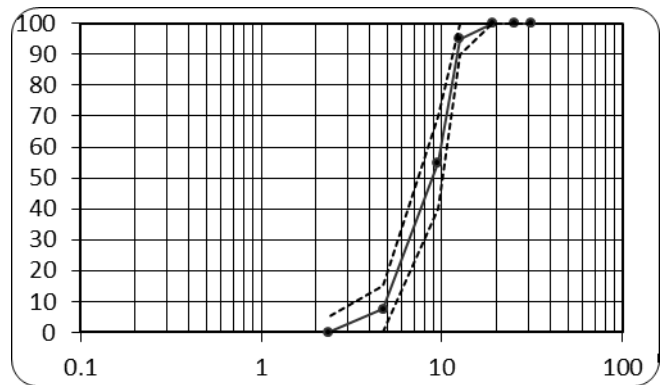
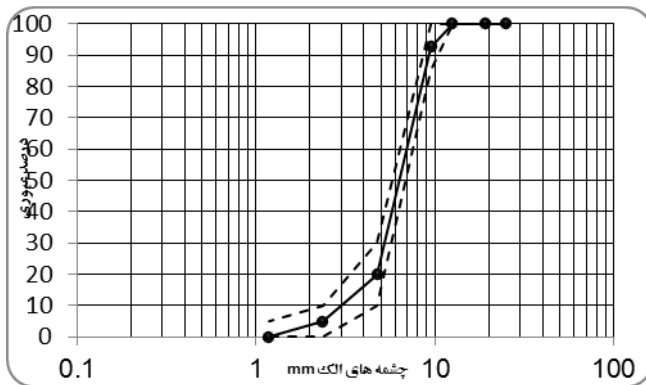
نام طرح	C9.5	C12.5	C16	C19	C25	C32
$D_{max}$ (mm)	9/5	12/5	16	19	25	32

## 3. مصالح مصرفی

دانه بندی ماسه و شن مصرفی مطابق ملزومات استاندارد ASTM می‌باشد. مصالح سنگی ریز دانه مصرفی دارای مدول نرمی ماسه 3/12 و SE آن برابر 85 درصد می‌باشد. منحنی دانه بندی ماسه و شن به ترتیب در شکل‌های (1) و (2) ترسیم شده است. برای افزایش میزان کارایی مخلوط‌های بتنی، از فوق روان کننده با نام تجاری FOSROC335 که بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر می‌باشد استفاده شده است. سیمان مصرفی در این تحقیق آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II، تولید شده در کارخانه سیمان سبزواری انتخاب گردید. ترکیب شیمیایی سیمان در جدول (2) ارائه گردیده است.



شکل 1- منحنی دانه بندی ماسه



شکل 2- منحنی دانه بندی درشت دانه

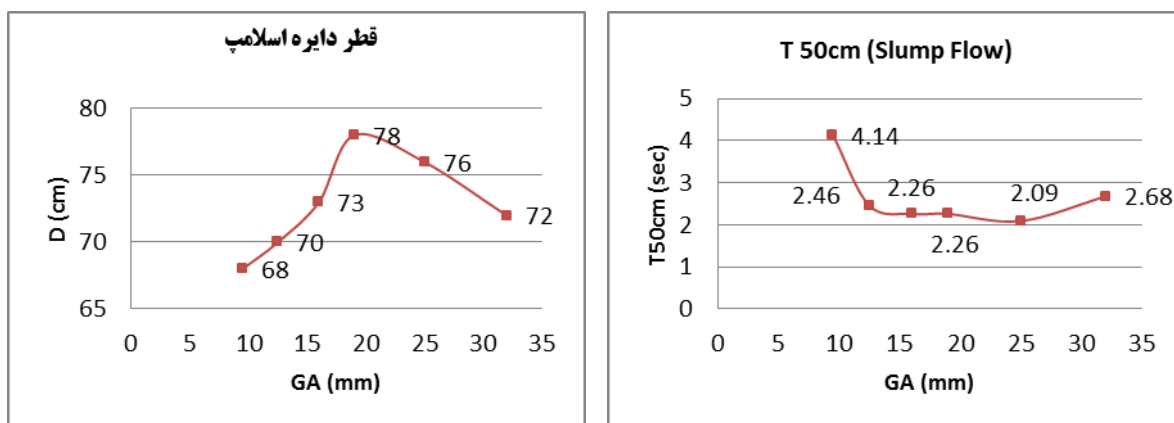
جدول 2- نتایج تجزیه شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیب شیمیایی	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mgo	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
سیمان	721/18	5/25	3/55	2/65	62/88	0/57	0/45	2/91	-	-	1/05

#### 4. نتایج آزمایشات و بررسی آنها

##### 4-1- آزمایش جریان اسلامپ و جریان اسلامپ 50 سانتیمتر

این آزمایش یکی از آزمایش‌های رایج برای سنجش خصوصیات بتن خودتراکم است و به منظور تعیین توانایی تغییر شکل بتن تحت اثر وزن خود بدون هیچ قیدی بجز اصطکاک صفحه جریان تعریف شده است [5] نتایج این آزمایش در شکل (3) مشاهده می‌شود.



شکل 3- نتایج آزمایش جریان اسلامپ

قطره دایره‌ای که پس از پخش شدن ایجاد می‌شود نشان دهنده تنش تسلیم بتن تازه و معیار سنجش قابلیت پراکنندگی بتن است. همانطور که ملاحظه می‌شود تمامی نمونه‌ها دارای کارپذیری و تنش تسلیم در محدوده 550 تا 850 میلیمتر هستند. در جدول (3) محدوده کارپذیری طرح‌ها با توجه به طبقه بندی موسسه EFNARC مشخص شده است. [6 و 7]

جدول 3- محدوده کارپذیری طرح‌ها

نام طرح	جریان اسلامپ (mm)	رده بتن
-	550-650	SF1
C32-C16-C12.5-C9.5	660-750	SF2
C25-C19	760-850	SF3

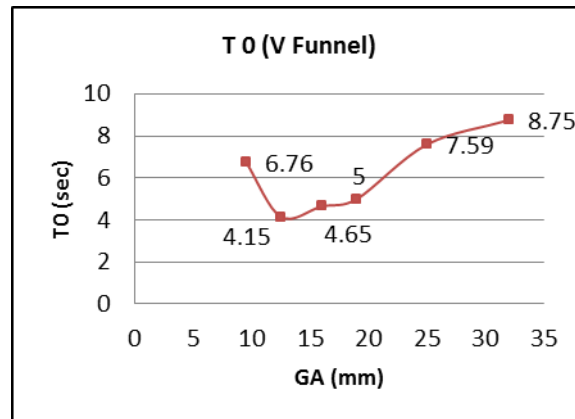
همانطور که ملاحظه می‌شود، طرح C9.5 دارای کمترین قطر اسلامپ می‌باشد و با افزایش حداکثر بعد سنگدانه قطر اسلامپ افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به لزجت زیاد طرح C9.5 مربوط دانست. بعلاوه ریزی درشت دانه مصرفی درگیری ذرات سنگی با یکدیگر زیاد بوده و از طرفی دیگر میزان سیمان بیشتری صرف احاطه سطح دانه‌های سنگی شده است در نتیجه لزجت این طرح بالا رفته است. با افزایش بعد دانه از این دو عامل کاسته شده و روانی طرح‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش بعد دانه از 19 میلیمتر شاهد آن هستیم که از روانی طرح‌ها کاسته می‌شود، دلیل این امر این است که با افزایش بعد دانه به میزان 25 و 32 میلیمتر دانه‌های درشت موجود در مخلوط از حرکت سریع مخلوط جلوگیری کرده و باعث افزایش تنش تسلیم در این طرح‌ها می‌شوند.

همانطور که ملاحظه می‌شود زمان رسیدن جریان اسلامپ طرح‌های بتن به شعاع 50 سانتیمتر کمتر از یک ثانیه و بیشتر از 5 ثانیه نشده است (در محدوده یک تا 5 ثانیه قرار دارند) که این نشان دهنده لزجت مناسب طرح‌های اختلاط می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود طرح C9.5 با زمان 4/14 ثانیه بیشترین زمان را صرف کرده است

تا به شعاع 50 سانتیمتری برسد که نشان دهنده لزجت زیاد این طرح نسبت به سایر طرح‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در هیچ یک از طرح‌ها با حداکثر سنگدانه‌های مختلف پدیده جدایشگی و آب انداختگی مشاهده نشده است.

#### 2-4- آزمایش قیف V شکل

در این آزمایش مدت زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه‌گیری شده و به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پراکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج این آزمایش در شکل (4) مشاهده می‌شود.

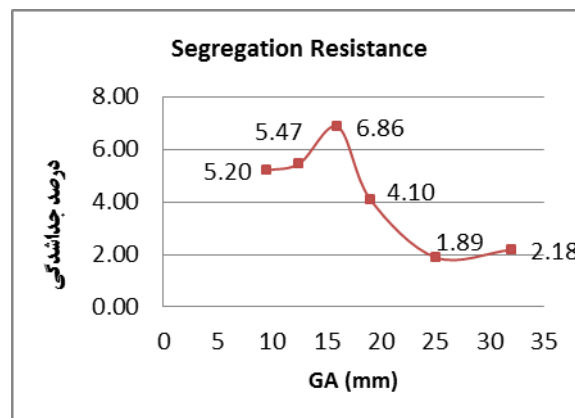


شکل 4- نتایج آزمایش قیف V

همانطور که مشاهده می‌شود، زمان تخلیه طرح C9.5 برابر 6/76 ثانیه بوده که مطابق آزمایش جریان اسلامپ نشان دهنده لزجت زیاد این طرح می‌باشد. با افزایش بعد دانه تا 12/5 میلیمتر از این لزجت کاسته می‌شود و مدت زمان تخلیه قیف V کاهش می‌یابد؛ ولی با افزایش بعد حداکثر اندازه دانه و درشت شدن مخلوط شن زمان تخلیه قیف V دوباره افزایش می‌یابد. بطوری که مخروط بتن با حداکثر اندازه 32 میلیمتر با زمان تخلیه 8/75 ثانیه بیشترین زمان را در بین نمونه‌ها داراست. این پدیده را نمی‌توان به لزجت این طرح مربوط دانست زیرا با افزایش بعد دانه از لزجت طرح‌های اختلاط کاسته می‌شود. بلکه وجود دانه‌های درشت در مخلوط تازه بتن سبب جلوگیری از تخلیه سریع بتن از قیف V می‌شوند. لازم به ذکر است که نحوه خروج بتن از قیف V در تمامی طرح‌ها بصورت یکنواخت و همگن بوده و هیچ گونه جدایشگی در بتن مشاهده نشده است.

#### 3-4- آزمایش GTM یا پایای الک

این آزمایش روشی برای تعیین قابلیت پایداری و میزان آب انداختگی بتن خودتراکم بوده به طوری که شاخصی برای سنجش مقاومت در برابر انواع جدایشگی در بتن تازه می‌باشد. [5] نتایج این آزمایش در شکل (5) مشاهده می‌شود.



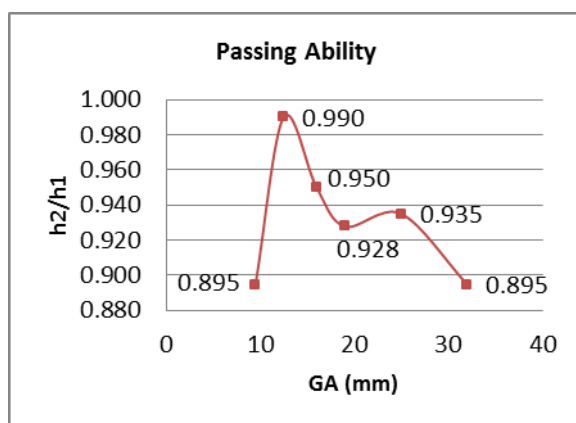
شکل 5- نتایج آزمایش GTM

طبق استاندارد موسسه EFNARC اگر درصد ملاتی که از الک عبور کرده (درصد جداشدگی) بین 5 درصد تا 15 درصد وزن نمونه باشد مقاومت در برابر جداشدگی مناسب است در صورتی که درصد جداشدگی کمتر از 5 درصد باشد ملات بتن کارایی مناسب را ندارد و احتمال کرم شدن سطح تمام شده بتن وجود دارد اما درصد جداشدگی بالای 15 درصد خطر وقوع جداشدگی را نشان می‌دهد. [6 و 7] همانطور که ملاحظه می‌شود درصد جداشدگی در طرح‌های C9.5-C12.5-C16 در محدوده معرفی شده استاندارد موسسه EFNARC می‌باشند و بنابراین در برابر جداشدگی مقاومت لازم را دارا می‌باشند. ولی در سایر طرح‌ها بعلا افزایش بعد سنگدانه‌ها بتن کارایی مناسب را نداشته و میزان جداشدگی کمتر از 5 درصد بوده است.

با مقایسه نمودار پایایی الک و قیف V شاهد آن هستیم که درصد جداشدگی رابطه معکوسی با لزجت مخلوط بتن تازه دارد. به عنوان مثال در طرح C16 که زمان عبور مخلوط از قیف V کم می‌باشد، درصد جداشدگی ماکزیمم مقدار خود را داراست. این روند در تمامی طرح‌ها مشهود می‌باشد.

#### 4-4- آزمایش جعبه L

این آزمایش بیانگر قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم می‌باشد و به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها طراحی شده است. همچنین با انجام این آزمایش می‌توان وجود یا عدم وجود جداشدگی بتن را به صورت چشمی مشاهده نمود. نتایج این آزمایش در شکل (6) نشان داده شده است.

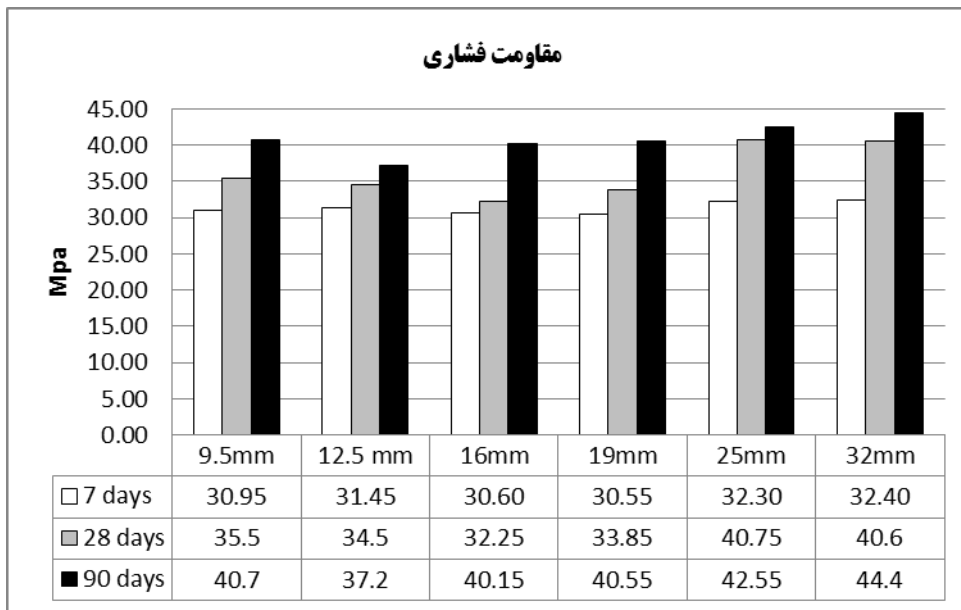


شکل 6- نتایج آزمایش جعبه L

از روی اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای مسیر جعبه L (نسبت انسداد) می‌توان میزان عبور بتن را محاسبه نمود. هر چه این نسبت  $h_2/h_1$  به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده قابلیت پرکنندگی بهتر بتن خودتراکم و کمتر بودن تنش تسلیم بتن است. همانطور که در شکل (6) ملاحظه می‌شود طرح‌های اختلاط C9.5 و C32.5 هر دو اختلاف ارتفاع یکسانی در ابتدا و انتهای مسیر از خود نشان داده‌اند ولی تفاوتی میان این دو طرح وجود دارد. در طرح C9.5 این اختلاف در اثر لزجت زیاد بوده ولی در طرح C32.5 بعلا درشت بودن مخلوط و کم بودن قابلیت پرکنندگی به وجود آمده است. همانطور که دیده می‌شود طرح C12.5 دارای نسبت انسداد بسیار نزدیک به یک است که نشان دهنده قابلیت پرکنندگی بسیار عالی این طرح می‌باشد. با افزایش بعد سنگدانه از این طرح به بعد شاهد افزایش اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای مسیر جعبه L هستیم که بیانگر کاهش قابلیت پرکنندگی و توان عبوری مخلوط بتن تازه می‌باشد.

#### 4-5- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح‌ها در سنین 7، 28 و 90 روزه براساس حداکثر بعد سنگدانه در شکل (7) مشاهده می‌شود



شکل 7- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین 7، 28 و 90 روزه

همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت فشاری تمام طرح‌های اختلاط افزایش پیدا کرده است. این روند افزایش تقریباً در تمام نمونه‌ها رشد ثابتی داشته است. همانطور که ملاحظه می‌شود در سن 7 روز مقاومت فشاری تمامی طرح‌های اختلاط بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشد که بیانگر تاثیر کم بعد سنگدانه در مقاومت سنین اولیه بتن می‌باشد. در سنین 28 و 90 روزه دو نمونه C25 و C32 دارای مقاومت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند که این روند را می‌توان به ایجاد ساختار و اسکلت بندی مناسب بتن با استفاده از سنگدانه درشت تر اختصاص داد.

## 5. نتیجه‌گیری

همانطور که ملاحظه می‌شود می‌توان با حداکثر بعد سنگدانه‌های مختلف بتن خودتراکم بصورت همگن و یکنواخت، بدون هیچگونه جداشدگی، آب انداختگی و انسداد ساخت. بنابراین می‌توان با ارائه یک طرح مناسب محدودیت حداکثر بعد سنگدانه را مرتفع نمود. با توجه به نتایج آزمایشات بتن تازه در می‌بایم که افزایش بعد سنگدانه از 19 میلیمتر به بعد باعث تغییر در رفتار بتن خودتراکم می‌شود دلیل این امر را می‌توان درشت تر شدن مخلوط بتن و توانایی عبور و پرکنندگی کم آن دانست. از نظر خواص رئولوژی دو طرح C16 و C12.5 بهترین نتایج را در بتن خودتراکم تازه دارا می‌باشند. از لحاظ مقاومت فشاری در سنین اولیه وجود حداکثر بعد سنگدانه‌های متفاوت تاثیر محسوسی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ندارند. اما با بالا رفتن سن نمونه‌های بتن تاثیر حداکثر بعد سنگدانه‌ها آشکار می‌شود بطوری که نمونه‌های C32 و C25 بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهند. در نهایت با توجه به رفتار بتن تازه و مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف، طرح C16 دارای نتایج مطلوب و قابل قبولی می‌باشد.

## 6. قدردانی

با سپاس فراوان از مدیریت شرکت بنیان بتن مشهد، بویژه مسئولین محترم آزمایشگاه بتن جناب آقایان مهندس رسول داودی و مهندس حمید سپهری که بدون همکاری آنان، انجام این پژوهش میسر نبود.

## 7. مراجع

- [1] موسوی، س.م. (1388)، "تاثیر مشخصات سنگدانه بر ویژگی های رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم مورد کاربرد در سرریز سدهای بتنی"، دانشگاه تهران، رشته مهندسی عمران - گرایش سازه‌های هیدرولیکی



- [2] مقصودی، ع.ا. و مقیمی، ر. (1390)، "تاثیر اندازه، نوع فیبر و نسبت سنگدانه های مختلف بر فزاد خمیری و مقاومت فشاری ابر بتن خودتراکم"، کنگره ملی بتن خودتراکم، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، اردیبهشت
- [3] شکرچی زاده، م. و لیبر، ن.ع. و خوش نظر، ر. (1390)، "بررسی تاثیر اندازه سنگدانه بر خواص رفتاری ملات تازه خودتراکم، کنگره ملی بتن خودتراکم"، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، اردیبهشت
- [4] کسمانکا، اس.اچ و پانارس، وی.سی. ترجمه خالو، ع.ر. و ایراجیان، م. "طراحی و کنترل مخلوط های بتن"، ویرایش 13، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- [5] شکرچی زاده، م. لیبر، ن.ع. ماهمتیان، م. (1390)، "تاثیر دانه بندی سنگدانه بر خواص بتن خودتراکم تازه و سخت شده، اولین کارآگاه تخصصی بتن خودتراکم"، دانشکده فنی دانشگاه تهران، 10 اسفند 1385
- [6] EFNARC, "specification and Guidelines for self-compacting concrete", Feb.2002, 32pp., <http://www.efnarc.org/>
- [7] EFNARC, "the Europein Guidelines for self-compacting concrete", May.2005, 68pp., <http://www.efnarc.org/>