



خواص رئولوژی بتن خودتراکم با جایگزینی ریزدانه با سرباره مس

یاسر شریفی¹، ایمان افشون²، زینب فیروزجایی²، محمدمین مومنی³

1- استادیار گروه مهندسی عمران - دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

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

2- دانشجویان کارشناسی ارشد سازه - دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

civil.afshoon@yahoo.com

eng.firooz@yahoo.com

3- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران - دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

amin.momeni@att.net

چکیده

از آنجایی که سنگدانه‌ها در حدود 70 تا 80 درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند، بررسی خواص و نحوه عملکرد آنها حائز اهمیت است. سنگدانه‌ها یا بصورت شکسته از کارخانجات سنگ‌شکن و یا بصورت گردگوشه از بستر رودخانه‌ها بدست می‌آیند. البته در بعضی مناطق به علت دور بودن از منابع تولید سنگدانه‌ها، تخریب طبیعت برای تولید سنگدانه‌ها و همچنین آلودگی‌های کاخانجات سنگ‌شکن، نیاز به یافتن موادی برای جایگزین کردن این مصالح، امری مهم تلقی می‌شود. سرباره مس یکی از این مواد جایگزین است که به علت عدم کاربرد خاص، بخصوص در کشورمان، همچنین تولید زیاد آن و آثار مخرب زیست محیطی ناشی از دپوی این ماده، در چند سال اخیر در صنعت بتن به عنوان جایگزینی برای سیمان، درشت-دانه‌ها و ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق با جایگزینی 0، 10، 20، 30، 40، 50 درصد از ریزدانه‌های بتن خودتراکم با سرباره مس خواص رئولوژی این نوع بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده بهبود خواص رئولوژی بتن خودتراکم با افزایش درصد سرباره مس است.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، ریزدانه‌ها، سرباره مس، رئولوژی، اسلامپ

1. مقدمه

بتن شامل سنگدانه‌های ریز و درشت است که به وسیله‌ی ژل خمیری چسبنده‌ای که توسط اختلاط سیمان و آب بدست می‌آید به یکدیگر چسبیده و مخلوطی تقریباً همگن و سیال را به وجود می‌آورد. سال‌های زیادی است که بتن به عنوان یک ماده ساختمانی مهم در ساخت و سازهایی چون ساختمان‌ها، سدها، پلها، تونلها، راهها، اسکله‌ها و برجها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اکثر موارد به بتن به عنوان ماده‌ای مقاوم در برابر نیروهای فشاری نگرسته می‌شده است. توسعه پایدار یک چالش جهانی است که حفاظت محیط زیست به عنوان جزء لاینفک آن در نظر گرفته می‌شود. امروزه فرآیندهای بازیابی با دو نگرش مهم، استفاده بهینه از منابع موجود مصرف شده و



حفاظت از محیط زیست، به طور جدی مورد توجه کشورهای جهان و در محدوده برنامه های توسعه آنان قرار گرفته است.

بتن خودتراکم یکی از انواع بتن های توانمند است. این بتن یک فناوری نوپا در عرصه ساخت و ساز دنیا محسوب می شود. نظریه بتن خودتراکم توسط پروفیسور او کامورا از دانشگاه کوچی ژاپن در سال 1986 پیشنهاد گردید. او کامورا در خلال تحقیقات خود دریافت که علت اصلی ضعف دوام و کارایی بتن در سازه های ساخته شده در ژاپن عدم یکپارچگی بتن در هنگام بتن ریزی می باشد و با توسعه بتن خودتراکم این نقاط ضعف را در ژاپن برطرف نمود [1]. از محاسن این بتن می توان به طول عمر بیشتر قالب ها، ساخت در زمان کوتاه تر، سطوح کار تمام شده ی بهتر، کاهش آلودگی صوتی، کاهش نیروی انسانی، محیط کار ایمن تر و آزادی عمل بیشتر برای طراحی مقاطع اشاره کرد. با توجه به تفاوت اجزاء بتن خودتراکم با اجزاء بتن معمولی که این تفاوت در کاربرد مواد سیمانی، استفاده از پودر سنگ به منظور ماده اصلاح کننده ویسکوزیته با حضور دیگر مواد افزودنی به ویژه ماده فوق کاهنده آب بروز می یابد، خواص بتن تازه و مشخصات رئولوژی آن می تواند متفاوت از بتن معمولی باشد، اما به هر نحوی هردوی بتن معمولی و خودتراکم در صورتی که برای درجات مقاومتی مشابه به کار روند، خواص مکانیکی تقریباً مشابهی را نشان خواهند داد [2]. بتن خودتراکم در عین دارا بودن کارپذیری و روانی زیاد، مقاومت کافی در برابر جداشدگی و آب انداختگی داشته و می تواند مخلوطی همگن و متراکم فراهم نماید. انجام پروژه های وسیع تحقیقاتی بروی مواد مختلف تشکیل دهنده بتن و آزمایش بتن های مختلف با مواد جدید در سالهای آخر قرن اخیر منجر به پیدایش بتن هایی شده است که علاوه بر تامین مقاومت، خواص دیگری از این ماده نظیر دوام، کارایی، نرمی و مقاومت در برابر عواملی چون آتش و محیط و هوازگی را دستخوش تغییرات اساسی نموده است. در این میان از یک سو، با پیشرفت علم و تکنولوژی و پیدایش سیستم های پیچیده تر ساختمانی و از سوی دیگر با روند رو به گسترش ساخت و سازهای عمرانی در سطح کلان، نیاز به بکارگیری مصالح ساختمانی جدیدتر با کارایی بیشتر، احساس می شود. در دهه های اخیر، برای رفع و کاهش نواقص بتن و رسیدن به بتن بادوام، استفاده از مواد مضاف پوزلانی مانند میکروسیلیس، سرباره ها، خاکستر بادی و شیشه به عنوان جایگزین قسمتی از سنگدانه ها و یا سیمان مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است که، ضمن کاهش مصرف انرژی، موجب کاهش آلودگی و کمک به حفظ محیط زیست نیز می کند.

مس یکی از عناصر فلزی نرم و انعطاف پذیر است که، هدایت الکتریکی و حرارتی بالایی داشت و در حالت خالص رنگی نارنجی مایل به قرمز دارد. فرآیند استخراج مس از سنگ معدن مس با توجه به نوع سنگ معدن و خلوص مورد نظر برای محصول نهایی متفاوت است. هر فرآیند شامل مراحل مختلفی است که مواد غیر لازم از نظر فیزیکی و شیمیایی به تدریج حذف شده و غلظت مس بالا می رود [3]. در این مراحل با ذوب کردن سنگ معدن مس و انجام مراحل خالص سازی، در انتها، فلزات و عناصر جدا شده بصورت سرباره از کوره ها خارج شده که آنها را با آب و یا قرار دادن در هوای آزاد سرد می کنند. سپس به وسیله آسیاب هایی این سرباره ها را خرد کرده و دانه بندی می کنند. سرباره مس دارای خواص مکانیکی مطلوب مانند سختی بالا، مقاومت در برابر سایش و



جذب آب کمتر است [4]. در ایران به علت وجود معادن و منابع زیاد، این ماده به مقدار نسبتاً زیادی در دسترس بوده و قیمت آن نسبت به سیمان نیز کمتر است. استان کرمان دارای معادن بزرگ مس بوده و سرباره کوره‌های آن بصورت یک ماده زائد جداسازی می‌شود. سرباره مس یکی از موادی است که طی چند سال اخیر از کوره‌های مس در ایران جداسازی می‌شود و معمولاً برای زنگ زدایی از قطعات فولادی یا همان سندبلاست استفاده می‌شود و قبل از آن مصرف عمده‌ای نداشته است. این ماده می‌تواند به عنوان یک پوزولان مصنوعی در بتن استفاده شود. به طور متوسط برای تولید هر تن مس حدود 2/2 تا 3 تن سرباره مس ایجاد می‌شود [5].

از کاربردهای دیگر سرباره مس، مخلوط کردن با خاک‌هایی است که از لحاظ ثبات و پایداری در ساخت سدها و بستر بزرگراه‌ها مشکل دارند، استفاده از این ماده این نقص را برطرف می‌کند. دلیل اصلی این امر وزن مخصوص بالای این ماده است. از طرفی وجود مقدار سیلیس در حدود 26 درصد در سرباره مس، این ماده را به عنوان جایگزین مناسبی برای استفاده به عنوان سنگدانه‌ها معرفی کرده است.

Brindha و همکاران در تحقیق خود به بررسی مشخصات دوام و خوردگی بتن‌های حاوی سرباره پرداختند. آنها دریافته‌اند که مقاومت فشاری و مقاومت دو نیم‌شدگی بتن‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه شاهد بیشتر شده است [6]. Sudarvizhi و Ilangovan نیز در بررسی‌های خود بر روی بتن‌های حاوی سرباره به این نتیجه رسیدند که رفتار سرباره‌های مس در بتن مثل رفتار سنگدانه‌ها است. آنها بیان کردند که استفاده از سرباره مس حدود 20 درصد چگالی را افزایش می‌دهد و باعث افزایش کارپذیری بتن در مقایسه با طرح شاهد می‌شود [7]. Al-Jabri و همکاران عملکرد بتن‌های با مقاومت بالا، ساخته شده از سرباره مس به عنوان ریزدانه‌ها، را مورد بررسی قرار دادند. آنها اعلام کردند که در جایگزینی 100 درصد ریزدانه‌ها با سرباره مس میزان نیاز به آب بتن حدود 22 درصد کاهش می‌یابد. افزایش مقاومت و دوام با افزایش درصد جایگزینی نیز یکی دیگر از نتایج آنها بود [8]. Wu و همکاران نیز با مطالعه بتن‌های با مقاومت بالا که با جایگزینی سنگدانه‌ها با سرباره مس ساخته شده بودند، توانستند جایگزینی 40 درصد را به عنوان بهینه‌ترین حالت جایگزینی معرفی کنند [9]. Al-Jabri و همکاران با بررسی اثر سرباره مس به عنوان سنگدانه‌ها روی خواص ملات‌های سیمانی و بتن متوجه شدند که با افزایش درصد جایگزینی چگالی کمی افزایش می‌یابد، ولی کارپذیری افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. آنها نیز 40 تا 50 درصد جایگزینی را بهینه‌ترین حالت معرفی کردند [10].

2. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق سعی شده با جایگزینی سنگدانه‌های ریز با سرباره مس در درصدهای 0، 10، 20، 30، 40، 50 خواص رئولوژی بتن خودتراکم تولید شده را مورد ارزیابی قرار دهیم. نام‌گذاری طرح‌ها به ترتیب بصورت mix-0، mix-10، mix-20، mix-30، mix-40، و mix-50 بوده است. آزمایشات رئولوژی شامل اسلامپ، آزمایش حلقه J، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L جهت بررسی خواص رئولوژی انجام شده است. پس از

ترسیم گراف‌های مربوط به نتایج، سعی شده است نتایج مورد تفسیر و ارزیابی قرار گیرند. جزئیات طرح اختلاط-ها در جدول 1 قابل مشاهده است. در جدول 1، CS مخفف از Copper Slag (سرپاره مس) و FA مخفف Fine Aggregate (سنگدانه‌های ریز) بوده و SP (فوق روان کننده) درصدی از وزن سیمان است.

جدول 1- جزئیات طرح اختلاط ها

Detail mix	Mix	Coarse	Fine	CS	Cement	W/C	SP
0% CS+100%FA	mix-0	700	950	0	400	0.51	1.2
10% CS+90%FA	mix-10	700	855	95	400	0.51	1.2
20% CS+80%FA	mix-20	700	760	190	400	0.51	1.2
30% CS+70%FA	mix-30	700	665	285	400	0.51	1.2
40% CS+60%FA	mix-40	700	570	380	400	0.51	1.2
50% CS+50%FA	mix-50	700	475	475	400	0.51	1.2

3. مصالح مورد استفاده

سیمان مصرفی در کلیه این طرح‌ها سیمان پرتلند تپ 2، ساخت کارخانه سیمان ممتازان کرمان است. این سیمان در برابر حمله سولفات‌ها و نمک‌ها مقاوم است و از لحاظ گیرش همانند سیمان معمولی بوده و دارای زمان گیرش معمولی است لازم به ذکر است برای ذرات با اندازه کوچکتر از 300 میکرومتر نیز از پودر سنگ استفاده می‌شود. سرپاره مس مصرفی در این آزمایش تولید شده در مجتمع مس سرچشمه است. خصوصیات سیمان و سرپاره مس مصرفی در جدول 2 آورده شده است. برای کاهش میزان مصرف آب در بتن و همچنین افزایش روانگرایی بتن از فوق روان کننده فرکوپلاست P10-3R بر پایه کربوکسیلات اتر که میزان مصرف آن بین 0.1 تا 1.6 درصد وزن سیمان می باشد استفاده شده است. این فوق روان کننده در مقایسه با فوق روان کننده‌های متداول بتن که بیشتر آنها بر پایه ملامین سولفات و نفتالین فرمالدئید هستند با میزان مصرف کمتر، کارایی بسیار بالاتری داشته و روانی فوق العاده‌ای بدست می‌دهد. عکس شماره‌ی 1 سرپاره مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول 2- مشخصات سیمان و سرپاره مس

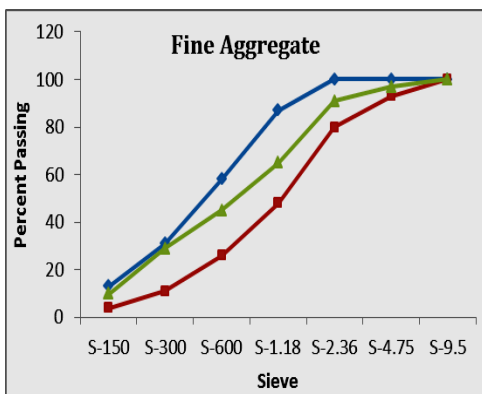
Materials	chemical components by mass percentage							
	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C ₃ A	SO ₃	L.O.I	CuO
Copper slag	5	34	2	47-54	0	0.11	0	6
Cement	1.4	21.2	4.6	3.8	6	2.45	1	0

سرپاره مس بصورت دانه‌های شیشه‌ای سیاه که دامنه اندازه ذرات آن مثل ماسه است معمولاً در کارخانجات تولید مس یافت می‌شود. وزن مخصوص آن بین 3/4 تا 3/98 بوده و چگالی حجمی آن بین 1/9 تا 2/15 کیلوگرم

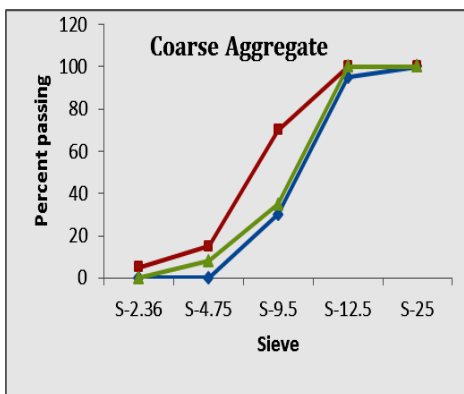
بر متر مکعب متغیر است. سختی آن در مقیاس MOH بین 6 تا 7 است. میزان رطوبت موجود در سرپاره کمتر از 0/5 درصد است. در شکل 2 و 3 به ترتیب نمودارهای دانه‌بندی برای درشت‌دانه و ریزدانه را مشاهده می‌کنید.



شکل 1- سرپاره مس مصرفی



شکل 3- دانه‌بندی ریزدانه



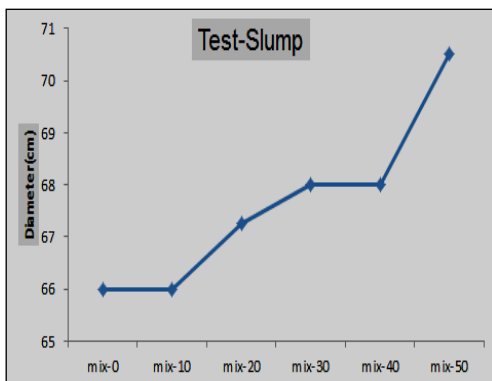
شکل 2- دانه‌بندی درشت‌دانه

4. آزمایشات بتن تازه

1/4. آزمایش اسلامپ

آزمایش اسلامپ اولین بار در ژاپن برای برآورد کارایی بتن‌های اجراشونده در زیر آب مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش معیاری برای بررسی قابلیت جریان و پرکنندگی بتن است. نتایج این آزمایش با اندازه‌گیری دو قطر عمود برهم بتن پخش شده بعد از بلند کردن مخروط ناقص قابل ارزیابی است. قطر دایره‌ای که پخش شده نشان‌دهنده تنش تسلیم بتن تازه است. طبق دستورالعمل موسسه EFNARC میانگین دو قطر عمود بر هم باید بین 55 تا 85 سانتیمتر با توجه به کاربرد بتن باشد. در این آزمایش بتن تحت اثر وزن خود شروع به جریان می‌کند. در

شکل 4 انجام آزمایش اسلامپ را مشاهده می کنید. در شکل 5 نتایج ارائه شده است. به علت وزن مخصوص بالاتر سرباره مس و همچنین میزان جذب آب کمتر آن، معیار آزمایش اسلامپ با افزایش درصد سرباره افزایش می یابد. ضمناً نتایج اندازه گیری زمان رسیدن بتن به قطر 50 سانتیمتر (T_{50})، بیانگر کاهش لزجت خمیری بتن تازه است. از طرفی بطور کیفی میزان آب انداختگی و جداسدگی بتن در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفت که، نشانه‌ای از آب انداختگی و جداسدگی مشاهده نشد.



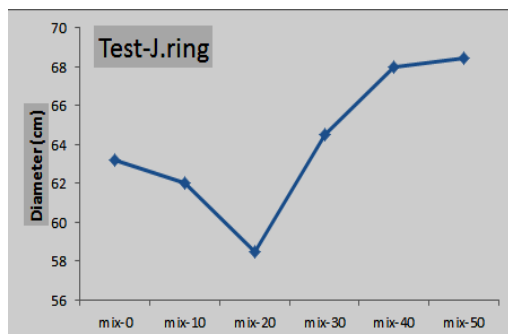
شکل 5- معیار آزمایش اسلامپ



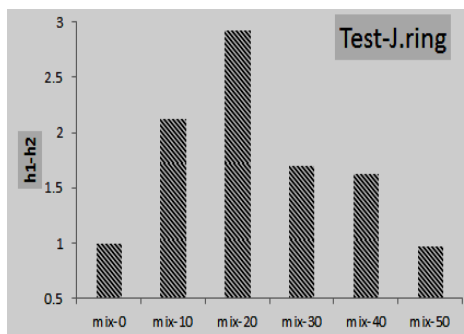
شکل 4- معیار آزمایش اسلام

2/4. آزمایش حلقه J

در این آزمایش اختلاف ارتفاع بتن در مرکز حلقه و میانگین ارتفاع در خارج حلقه را به عنوان معیار این آزمایش اندازه گیری می کنیم. میزان اختلاف مجاز حدود یک سانتیمتر است البته در تحقیقات دیگری موارد بزرگتر از این حد مجاز نیز گزارش شده است. در واقع این آزمایش مدلسازی عبور بتن از میان آرماتورها است. در شکل 6 نتایج اختلاف ارتفاع بتن در داخل و خارج حلقه قابل مشاهده است (h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع بتن در خارج حلقه و داخل آن است). در شکل 7 نیز نتایج قطر بتن پخش شده را مشاهده می کنید. با توجه به نتایج، به علت ایجاد اصطکاک دانه‌های زاویه‌ای سرباره تا جایگزینی 20 درصد اختلاف ارتفاع بتن زیاد شده و از طرفی میزان قطر بتن پخش شده کمتر شده است. در واقع تا این میزان درصد جایگزینی اصطکاک ایجاد شده موثرتر از میزان آب پس زده شده توسط دانه‌های سرباره است. اما در درصد های 30 و بالاتر افزایش آب بر اثر جذب کمتر دانه‌های سرباره باعث رواتر شدن و کاهش اصطکاک بین دانه‌ها شده است. در نتیجه قطر بتن پخش شده بیشتر و اختلاف ارتفاع بتن کمتر شده است. در شکل 8 انجام آزمایش حلقه برای جایگزینی 30 درصد و در شکل 9 انجام همین آزمایش را برای جایگزینی 20 درصد مشاهده می کنید. در هنگام انجام این آزمایش نیز هیچ گونه آب انداختگی مشاهده نشد.



شکل 7- نتایج قطر بتن پخش شده



شکل 6- نتایج تفاوت ارتفاع داخل و خارج حلقه J



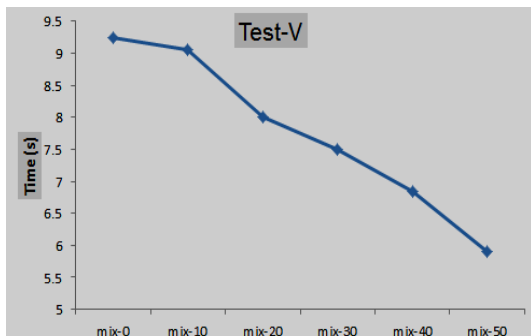
شکل 9- جایگزینی 20 درصد سرباره



شکل 8- جایگزینی 30 درصد سرباره

3/4 آزمایش قیف V

مدت زمان خروج بتن از قیف V شکل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در واقع این آزمایش شبیه- سازی عبور بتن از مقاطع مختلف اعضای سازه‌ای است. حدود معمول این آزمایش 6 تا 12 ثانیه است. البته در مواردی مشاهده شده، بتن‌های خودتراکم با زمان آزمایش قیف خارج از این محدوده نیز به خوبی به کار برده شده‌اند. در شکل 10 قیف V شکل جهت انجام این آزمایش مشاهده می‌شود. نحوه خروج بتن به طور شهودی می‌تواند معیاری برای بررسی میزان جداشدگی بتن باشد. در شکل 11 نتایج این آزمایش ارائه شده است. نتایج حاکی از عبور خوب بتن از قیف آزمایش است. تا جایگزینی 20 درصد کاهش قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود ولی در درصد‌های بالاتر میزان آب اضافی در بتن روانی قابل ملاحظه‌ای به بتن می‌دهد.



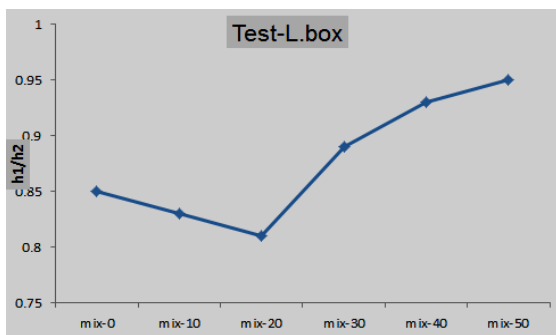
شکل 11- معیار آزمایش قیف V



شکل 10- قیف V شکل

4/4. آزمایش جعبه L

در واقع با انجام این آزمایش قابلیت عبور بتن از میان تراکم میلگردها و همچنین قابلیت پرکنندگی بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. زمان‌های T_{20} و T_{40} که نشان‌دهنده‌ی لزجت خمیری و روانی بتن است از دیگر پارامترهای بتن می‌باشد که در این آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. نسبت ارتفاع بتن بعد از دریاچه به ارتفاع بتن قبل از دریاچه معیار اصلی این آزمایش است که هرچه به عدد یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده‌ی قابلیت عبور و پرکنندگی بیشتر بتن مورد آزمایش است. در شکل 12 انجام آزمایش جعبه برای جایگزینی 30 درصد قابل مشاهده است. در شکل 13 نتایج این آزمایش ارائه شده است. قابلیت عبور در درصد های 10 و 20 تا حدودی دچار کاهش شده است ولی در درصد های بالاتر می‌توان گفت که به علت جذب کمتر آب سرباره و افزایش آب بتن قابلیت عبور افزایش یافته است. (h_2 و h_1 به ترتیب ارتفاع بتن قبل و بعد از دریاچه است).



شکل 13- معیار آزمایش جعبه L



شکل 12- معیار آزمایش جعبه L

5. نتیجه گیری

در این تحقیق با جایگزینی ریزدانه‌ها با سربراره مس مشاهده شد که با افزایش درصد جایگزینی میزان اسلامپ افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن افزایش آب بتن بر اثر جذب آب کمتر سربراره و همچنین بیشتر بودن وزن مخصوص سربراره مس نسبت به سنگدانه‌های ریز است. افزایش درصد جایگزینی در آزمایش حلقه ابتدا باعث کاهش قطر بتن پخش شده، که عمدتاً ناشی از ایجاد اصطکاک دانه‌های سربراره به علت زاویه دار بودن آنها است، شد. ولی در درصد‌های بالاتر افزایش میزان آب بر این اصطکاک غلبه کرده و معیارهای این آزمایش را بهبود می‌بخشد. در مورد آزمایش قیف افزایش درصد جایگزینی باعث بهبود معیار این آزمایش شده است از طرفی هنگام خروج بتن از دریچه قیف جداشدگی و انسدادی مشاهده نشده است. نتایج آزمایش جعبه L نیز بیانگر محدود شدن معیارهای این آزمایش در درصد‌های جایگزینی 10 و 20 بوده که در درصد‌های بالاتر جایگزینی نیز این معیارها بهبود یافته‌اند.

6. تقدیر و تشکر

از کمک و حمایت اداره محترم راه و شهرسازی استان کرمان و همچنین دانشگاه ولی عصر رفسنجان قدردانی می‌شود.

7. مراجع

- [1] Okamura H, Ouchi M. Self-compacting concrete Development, present use and future, *First International RILEM symposium on self-compacting concrete, Rilem Publications, Stockholm*, 3–14, 1999.
- [2] حیاتی، پ.، زیاری، ح، و سبحانی، ج، بررسی تاثیر نوع پوزلان بر روی خواص مکانیکی و دوام روسازی‌های بتنی خودتراکم مورد استفاده در سطوح پروازی فرودگاه‌ها، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن، تهران، ایران، 1392.
- [3] Lavanya C, Sreerama Rao A, Darga Kumar N. A Review on utilization of copper slag in geotechnical applications, *Proceeding of Indian Geotechnical Conference*, H-212, 2011.
- [4] Shi C, Meyer C, Behnood A. Utilization of copper slag in cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 1115–1120, 2008.
- [5] Nazer A. Effect of type cement on the mechanical strength of copper slag mortars *Metallurgy and materials*, 66(1), 85-90, 2013.
- [6] Brindha D. Baskaran T, Nagan S. Assessment of Corrosion and Durability Characteristics of Copper Slag Admixed Concrete, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Volume 1, No 2, 192-211, 2010.
- [7] Meenakshi Sudarvizhi S. Ilangovan R. Performance of Copper slag and ferrous slag as partial replacement of sand in Concrete, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Volume 1, No 4, 918-927, 2011.
- [8] Al-Jabri kh. Hisada M. Al-Saidy A. Al-Oraimi S.k. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 23, 2132–2140, 2009.
- [9] Wua W. Zhang W. Ma G. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete, *Materials and Design*, 31, 2878–2883, 2010.



- [10] Al-Jabri kh. Al-Saidy A. Ramzi Taha. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 933–938, 2011.