



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰
تالار شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



اولین کنفرانس ملی بتن سبک

تأثیر نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان در مقاومت، چگالی و هزینه بتن سبک سازه ای

محمد تیموری موگویی^{*}، امیرسامان مهدویان^۱، سعید طلائی^۱، نعمت الله بخشی^۲

^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، تهران
^۲ کارشناس ارشد آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

چکیده

در کنار عوامل موثری همانند مقاومت بالا و چگالی پایین که بتن سبک سازه ای را به یکی از پرکاربردترین مصالح در سازه های مقاوم در برابر زلزله تبدیل کرده است، یکی دیگر از عوامل محدود کننده در تولید این نوع بتن صرفه اقتصادی آن است. در این مقاله تاثیر نسبت حجم خمیر سیمان به حجم سنگدانه بر روی مقاومت فشاری، چگالی، روانی و اقتصاد طرح در ۹ طرح اختلاط مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین اقتصاد طرح توسط شاخصی به نام فاکتور هزینه بر اساس قیمت مصالح مصرفی در بازار ایران تنظیم شده است. هدف اصلی این آزمایش ها بررسی اثرات حجم سنگدانه ها نسبت به حجم مواد چسبنده است. برای مشاهده بهتر این تاثیرات نسبت آب به سیمان و نوع سیمان (سیمان پرتلند تیپ ۲) ثابت در نظر گرفته شده و حجم کل خمیر سیمان با ثابت نگاه داشتن این نسبت ها جابجا گردیده و تاثیرات آن در عوامل مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح سنگی این طرح ها عبارت است از سنگدانه مصنوعی لیکا با سه دانه بندی مختلف شامل: الف) مخلوط ریزدانه و درشت دانه به علاوه ماسه، ب) درشت دانه سبک به علاوه ماسه، ج) ریزدانه سبک به علاوه ماسه

کلمات کلیدی: حجم مواد چسبنده، حجم سنگدانه، فاکتور هزینه، سنگدانه مصنوعی، مقاومت فشاری

۱- مقدمه

اعضای بتنی به علت مقاومت کمتر بتن نسبت به فولاد، در مقایسه با اعضای فولادی دارای ابعاد بزرگتری هستند و از این رو وزن اعضا در ساختمان های بتنی بخش قابل توجهی از بار مرده ساختمان را تشکیل می دهند [۱]. بتن سبک اغلب به عنوان جایگزین مناسب برای بتن معمولی و به منظور کاهش وزن سازه به کار می رود، هرچند مقاومت فشاری نهایی آن در مقایسه با بتن های معمولی مقدار کمتری است. اگرچه هزینه تولید بتن سبک سازه ای در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است اما معمولاً افزایش هزینه ناشی از اعمال تمهیدات ویژه در ساخت بتن سبک به ازای هر متر مکعب، با کاهش بار مرده و افزایش مقاومت بتن در مقابل آتش

سوزی و بهبود خواص عایق (صوتی و حرارتی) بودن بتن جبران می‌گردد. در واقع کاهش بار مرده موجب کاهش ابعاد پی سازه، کاهش ابعاد پی منفرد و کاهش عرض پی‌های زیر دیوار، ابعاد ستون‌ها، تیرها و همچنین کاهش ضخامت سقف می‌گردد که این موارد صرفه اقتصادی زیادی را ایجاد می‌کند [۲].

راه‌های مختلفی برای تولید بتن سبک وجود دارد. از این میان سه گروه اصلی قابل تشخیص است. نوع اول بتن سبکدانه با ساختار یکپارچه که در آن از سبکدانه معمولی در بتن استفاده می‌شود. این نوع بتن را می‌توان به عنوان بتن سازه‌ای، بتن غیر سازه‌ای یا عایق حرارتی استفاده کرد. روش دوم بر اساس داخل کردن حجم زیادی فضای خالی در بتن است که به عنوان بتن هوا دمیده (Aerated concrete)، بتن کفی (Foam concrete) یا بتن گازی (Gas concrete) نامیده می‌شود. مواردی نیز وجود دارد که سبکدانه نیز به چنین مخلوط‌هایی اضافه شده است. نوع سوم بتن‌های سبک با حذف ریزدانه از بتن ساخته می‌شود که سبب تشکیل تخلخل زیادی در بتن خواهد شد. در این نوع بتن‌ها اغلب از درشت‌دانه معمولی استفاده می‌گردد اما استفاده از سبکدانه می‌تواند وزن مخصوص بتن را تا حد زیادی کاهش دهد و خواص عایق حرارتی بهتری پدید آورد. این بتن‌ها با عنوان بتن بدون ریزدانه شناخته می‌گردند [۱].

بتن سبک طبق تعریف موسسه بتن امریکا عبارت است از بتنی که وزن مخصوص آن به طور محسوسی کمتر از وزن مخصوص بتنی است که با سنگدانه طبیعی یا شکسته ساخته می‌شود. این بتن‌ها عموماً دارای جرم مخصوصی بین ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و حداقل مقاومت فشاری تعریف شده برای آنها معادل ۱۷ نیوتن بر میلیمتر مربع است. در مناطق زلزله خیز آیین‌نامه‌ها حداقل مقاومت فشاری بتن سبک را به ۲۸ نیوتن بر میلیمتر مربع محدود می‌کنند [۲].

در کنار عوامل موثری همانند مقاومت بالا و چگالی پایین که بتن سبک سازه‌ای را به یکی از پرکاربردترین مصالح در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله تبدیل کرده است، یکی دیگر از عوامل محدود کننده در تولید این نوع بتن صرفه اقتصادی آن است. در این مقاله اقتصاد طرح توسط شاخصی به نام فاکتور هزینه بر اساس قیمت مصالح مصرفی در بازار ایران تنظیم شده است.

۲- مشخصات مصالح مصرفی

جدول (۱): مشخصات مصالح مصرفی

مصالح	چگالی SSD Kg / m ³	درصد رطوبت موجود	جذب آب (۳۰ دقیقه)
سیمان پرتلند تیپ ۲	۳۱۵۰	-	-
پودر سنگ آهک جوشقان	۲۶۵۰	-	-
ماسه شرکت متوساک	۲۵۶۰	۰/۹	۱/۵
لیکا ریز	۱۵۳۷	۱/۴	۸/۳
لیکا درشت	۱۲۳۰	۰/۸	۸/۲
فوق روان کننده Glenium 110P	-	-	-

مصالح سنگی طرح‌های اختلاط عبارت است از سنگدانه مصنوعی لیکا با سه دانه بندی مختلف شامل :

الف) مخلوط ریزدانه و درشت دانه به علاوه ماسه (L-I)

ب) درشت دانه سبک به علاوه ماسه (L-II)

ج) ریز دانه سبک به علاوه ماسه (L-III)

خواص اکثر بتن‌های سبک نسبت به دانه بندی مصالح بسیار حساس بوده و بسیار اهمیت دارد که دانه بندی طرح دقیقاً کنترل گشته و ثابت نگه داشته شود [۳].

۳- روند تعیین نسبت طرح های اختلاط

بعد از بدست آوردن مشخصات مصالح همانند چگالی، جذب آب و درصد رطوبت موجود آن ها گام بعدی روندی است که به تعیین نسبت های اختلاط موسوم است و با کمک آن ترکیب اجزای بتن برای رسیدن به اهداف مورد نظر به دست می آید. در واقع طرح اختلاط تعیین اقتصادی ترین و عملی ترین ترکیب مصالح تشکیل دهنده بتن برای تولید بتنی با کارایی قابل قبول (مجموع روانی، غلظت و چسبندگی)، مقاومت مورد نظر و دوام (دوام یا پایایی عبارت است از حفظ ویژگی های بتن در طول زمان).

در تعیین طرح اختلاط خصوصیات همچون مقاومت فشاری (در سن مورد نظر)، وزن مخصوص تازه و خشک بتن، کارایی و اسلامپ، دوام (با توجه به شرایط محیطی)، محدوده دانه بندی مطلوب (ASTM C330) و... از عوامل تعیین کننده هستند [۴]. روش تعیین نسبت های اختلاط در این مقاله روش حجم مطلق مطابق با ACI213R-03 می باشد [۵]. در این روش حجم یک متر مکعب بتن برابر با مجموع حجم سنگدانه ها، آب، مواد سیمانی و هوا در نظر گرفته می گردد. در این مقاله چون هدف بررسی نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان (حجم سیمان و آب) است، داده های اولیه ما عبارتند از نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان، نسبت آب به سیمان (که در تمام طرح ها ثابت در نظر گرفته شده است) و حجم هوا که با کمک این داده ها با روش حجم مطلق می توان حجم سیمان، آب و سنگدانه ها را به دست آورد و با توجه به چگالی مصالح و ویژگیهای رطوبتی و جذب آب آن ها و معیار قرار دادن محدوده دانه بندی استاندارد ارائه شده توسط ASTM C330 وزن تمامی مصالح مصرفی را محاسبه نمود. در برنامه EXCEL روند بالا پیاده گردید که در آن ورودی و خروجی به شرح زیر می باشند:

جدول (۲): ورودی و خروجی برنامه Excel

Input Data	$(V_{agg} / V_{(cement+water)})$	W / C	(%) Air Volume
Output Data	V_{cement}	V_{water}	$V_{aggregate}$

هدف اصلی بررسی اثرات حجم سنگدانه ها نسبت به حجم مواد چسبنده است برای مشاهده بهتر این تاثیرات نسبت آب به سیمان و نوع سیمان (سیمان پرتلند تیپ ۲) ثابت در نظر گرفته شده و حجم کل خمیر سیمان با ثابت نگاه داشتن این نسبتها جابجا گردیده و تاثیرات آن در مقاومت فشاری، چگالی، روانی و اقتصاد طرح مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول زیر حدود تغییرات وزن سیمان و سنگدانه ها در حجم یک متر مکعب آورده شده است:

جدول (۳): حدود تغییرات مصالح مصرفی

مصالح	مقدار کمینه Kg/m^3			مقدار بیشینه Kg/m^3		
	L-I	L-II	L-III	L-I	L-II	L-III
سیمان		۳۸۴		۵۱۲		
لیکا ریز	۳۲۶	-	۶۵۲	۳۶۷	-	۷۳۳
لیکا درشت	۲۹۷	۴۵۳	-	۳۳۴	۵۱۰	-
ماسه	۴۱۱	۶۴۲	۴۹۳	۴۶۳	۷۲۲	۵۵۵

لازم به ذکر است که جهت اطمینان از حصول کارایی مناسب، دوام و پیوستگی (Bond) مقدار سیمان معمولاً نباید کمتر از ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن باشد. از طرفی،، ازدیاد یش از حد مقدار سیمان انقباض و خزش، حرارت هیدراتاسیون در طی سخت شدن و خطر ترک خوردگی را افزایش می دهد [۳].

۴- روش اختلاط و عمل آوری

تمامی ۹ طرح ساخته شده با روشی واحد و با عمل آوری یکسان برای مقایسه بهتر نتایج ساخته شده است. روند اختلاط مصالح بدین ترتیب بوده است که :

- ۱- کل لیکا + یک سوم ماسه + یک سوم آب سپس ۱ دقیقه اختلاط
- ۲- اضافه کردن تمام سیمان، یک سوم ماسه، پودر سنگ آهک و یک سوم آب و نصف فوق روان کننده، ۲ دقیقه اختلاط
- ۳- باقیمانده ماسه و آب و در صورت لزوم (با توجه به روانی موجود) باقیمانده فوق روان کننده، ۸ دقیقه اختلاط

شرایط عمل آوری نمونه های ساخته شده ؛ ۲۴ ساعت درون قالب در محفظه رطوبت، ۶ روز در آب آهک، ۴۸ ساعت در اون، ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه. هنگام قرار دادن نمونه ها در اون دما بطورت تدریجی از ۰ تا ۱۰.۵ درجه بالا برده شده است و نمونه ها پس از خروج از اون برای عدم ایجاد ترک در اثر اختلاف دمای داخل و خارج بتن ۲۴ ساعت نمونه ها درون گونی و زیر پارچه در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند.

۵- طرح های اختلاط و بحث در مورد نتایج به دست آمده

برای هر کدام از سه دسته دانه بندی سه نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان (سیمان + آب) در نظر گرفته شده است و در مجموع ۷۲ نمونه مکعبی (10*10*10 cm) در قالب ۹ طرح اختلاط ساخته شد.

جدول (۴): مشخصات طرح های اختلاط

نام طرح	شماره طرح	$(V_{agg} / V_{(cement + water)})$	(%) Sand	(%) Fine agg	(%) Coarse agg
	۱	۲/۵			
L-I	۲	۲	۲۵	۳۵	۴۰
	۳	۳			
	۱	۲/۵			
L-II	۲	۲	۳۹	۰	۶۱
	۳	۳			
	۱	۲/۵			
L-III	۲	۲	۳۰	۷۰	۰
	۳	۳			

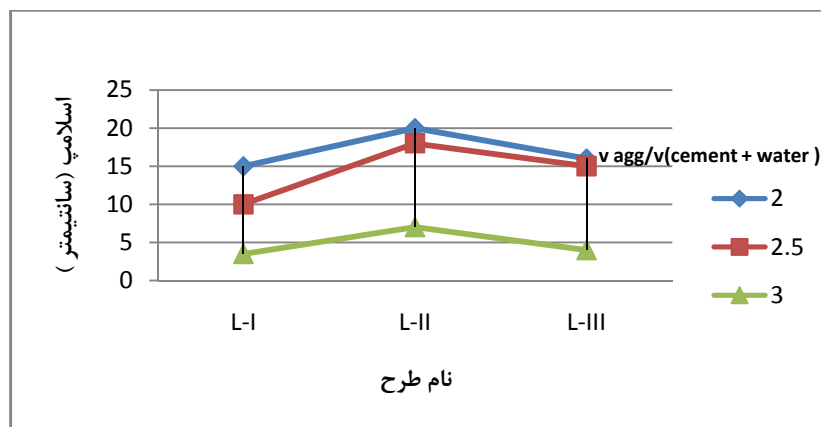
ذکر این نکته ضروری است که درصدهای مصالح سنگی در طرح های اختلاط به گونه ای انتخاب گردیده اند که منحنی دانه بندی بدست تا حد امکان در محدوده ی منحنی استاندارد مصالح سنگی (مطابق ASTM C30) باشد. ضمناً در تمامی طرح ها نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰/۳۲ در نظر گرفته شده است. همچنین تمام شرایط دیگر به جز موارد مذکور برای تمامی طرح ها یکسان در نظر گرفته شده است.

در جدول زیر نتایج حاصل از ساخت طرح های مذکور آمده است ؛

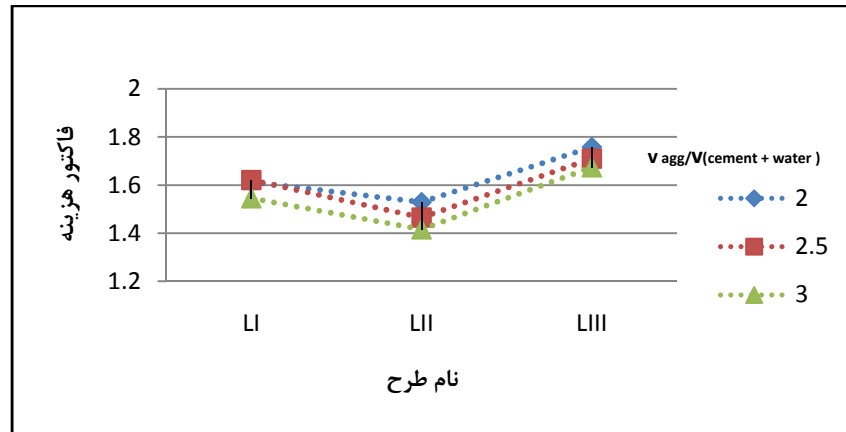
جدول (۵) : مقاومت فشاری و چگالی طرح های اختلاط

نام طرح	شماره طرح	میانگین چگالی Kg/m ³	میانگین مقاومت فشاری MPa	اسلامپ Cm	فاکتور هزینه	میانگین چگالی Kg/m ³	میانگین مقاومت MPa
L-I	۱	۱۶۰۴/۹۸	۳۶/۱۴	۱۰	۱/۶۲۱		
	۲	۱۶۳۵/۷۵	۳۶/۵۳	۱۵	۱/۶۱۲	۱۶۲۴	۳۵/۳
	۳	۱۶۳۱/۶۲	۳۳/۴۴	۳.۵	۱/۵۴۴		
L-II	۱	۱۶۲۱/۶۱	۳۴/۶۱	۱۴	۱/۴۶۵		
	۲	۱۶۵۱/۸۷	۳۴/۷۴	خیلی روان (۲۰)	۱/۵۲۹	۱۶۴۴	۳۵/۹۳
	۳	۱۶۵۸/۶۵	۳۸/۴۵	۷	۱/۴۱۶		
L-III	۱	۱۸۲۲/۰۰	۴۵/۳۹	۱۵	۱/۷۱۰		
	۲	۱۸۰۹/۱۵	۴۴/۷۷	۱۸	۱/۷۵۸	۱۸۱۷	۴۳/۴
	۳	۱۸۱۹/۵۳	۴۰/۱۲	۴	۱/۶۷۴		

در دو حالت دانه بندی (L-I, L-III) با افزایش نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان از ۲ به ۲.۵ تغییر ی در مقاومت فشاری حاصل نگردیده است ولی هنگامی که این نسبت به ۳ رسیده است کاهش در مقاومت را شاهد هستیم که دلیل اصلی را می توان کاهش مقدار سیمان و چسبندگی کمتر دانست، در این نسبت مقدار سیمان حدود ۳۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد و این نشان می دهد که این مقدار با توجه به اینکه سطح مخصوص در دسته های L-I, L-III زیاد تر از L-II است که فقط درشت دانه دارد چسبندگی لازم ایجاد نکرده است و به همین دلیل شاهد کاهش مقاومت بوده ایم. اما در حالت دانه بندی دوم که لیکای ریز حذف شده با افزایش نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان از ۲.۵ به ۳ افزایش در مقاومت رخ داده است، در توجیه این نتیجه اینگونه می توان گفت که به علت سطح مخصوص کم در این دانه بندی استفاده از خمیر سیمان بیشتر بی فایده است و علاوه بر اینکه هزینه را افزایش می دهد تاثیری بر مقاومت نداشته و در واقع حالت بهینه در مصرف سیمان این است که نسبت را برابر ۳ قرار دهیم. در نمودارهای زیر مقایسه روانی و هزینه سه دسته طرح اختلاط مقایسه شده اند.

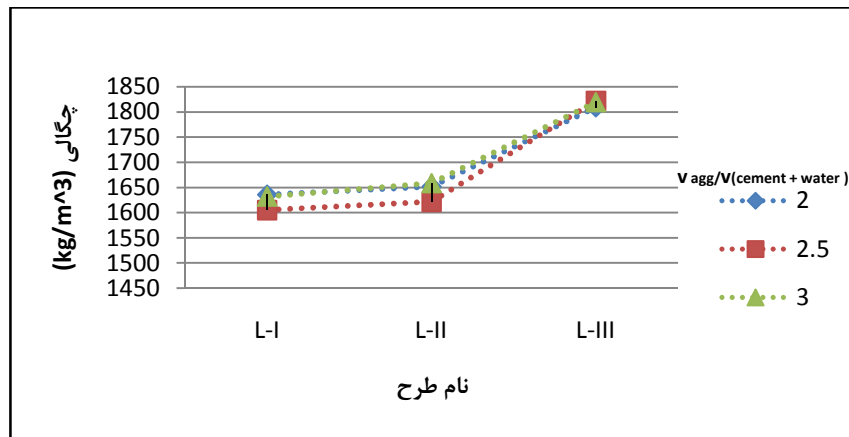


شکل (۱): مقایسه روانی سه دسته طرح با شاخص اسلامپ

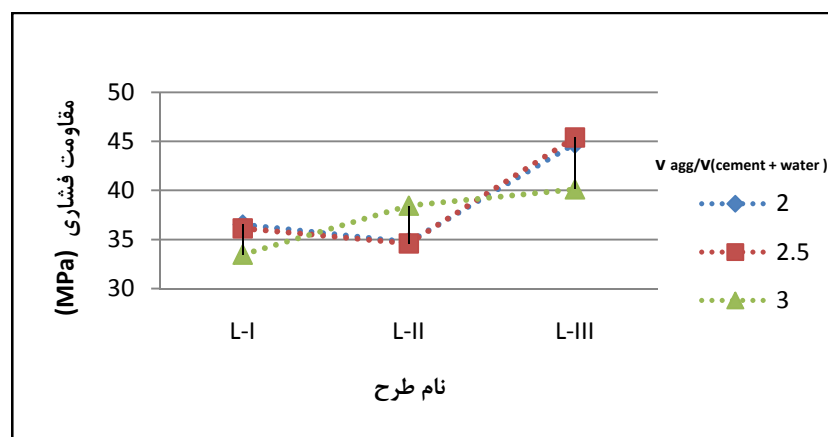


شکل (۲): مقایسه فاکتور هزینه سه دسته طرح اختلاط

در دو نمودار زیر روند تغییرات چگالی و مقاومت طرح ها با توجه به نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان نشان داده شده است :



شکل (۳): مقایسه چگالی سه دسته طرح اختلاط



شکل (۴): مقایسه مقاومت فشاری سه دسته طرح اختلاط

۶- هزینه طرح های اختلاط

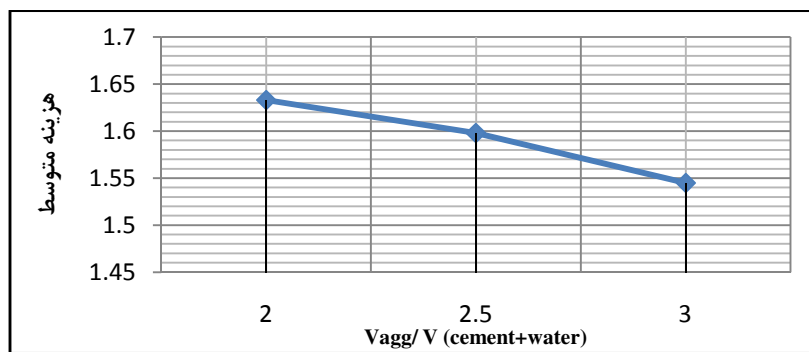
یکی از عوامل محدود کننده در تولید بتن سبک صرفه اقتصادی آن است. در این مقاله اقتصاد طرح توسط شاخصی به نام فاکتور هزینه بر اساس قیمت مصالح مصرفی در بازار ایران تنظیم شده است. این هزینه با رابطه ی پیشنهادی توسط آیین نامه پنجمین

دوره ی مسابقات ملی بتن محاسبه گردیده است.

هزینه تولید بتن سبک با توجه به قیمت بالاتر سبکدانه های مصنوعی نسبت به شن و ماسه بیشتر است. اما این تصور که چون هزینه تولید بتن سبکدانه بیشتر از بتن معمولی است لذا برای استفاده در ساخت وساز مناسب نیست تصور اشتباهی است. استفاده از بتن سبک در ستون ها از ارزش کمی برخوردار است زیرا صرفه جویی در وزن کم بوده، در ضمن هزینه بتن سبک بیشتر می باشد. در یک حالت معمولی و در شرایطی که تدارکات مساعد باشد مقدار کل صرفه جویی در هزینه می تواند ۵ تا ۷ درصد قیمت اسکلت بتنی باشد که اغلب کمتر از ۲٪ قیمت کل ساختمان است [۳].
در آیین نامه مسابقات ملی بتن رابطه زیر برای محاسبه هزینه طرح ارائه گردیده است :

$$p = \frac{1}{500} * (0.6 * cement + 0.6 * leca + 0.075 sand + 0.3 * filler + 28.5 * Super Plasticizer) \quad (4)$$

در رابطه فوق ضرایب بکار برده شده بر مبنای قیمت یک کیلوگرم مصالح در بازار انتخاب شده اند برای مثال با توجه به این که قیمت هر کیلوگرم فوق روان کننده مصرفی ۲۸۵۰۰ ریال می باشد، ضریب ۲۸/۵ در رابطه لحاظ گردیده است. در گراف زیر نتایج جدول بالا آورده شده است.



شکل (۵): مقایسه هزینه متوسط سه دسته طرح اختلاط

۷- نتیجه گیری

- ❖ با توجه از آزمایشات انجام شده که نتایج آن در جداول ۱ تا ۵ و نمودارهای ۱ تا ۵ آورده و مقایسه شده اند نتایج زیر بدست می آید :
- ❖ با افزایش نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان در حالتی که لیکای ریز نداشته باشیم و در نتیجه سطح مخصوص در مقایسه با دو دسته دانه بندی دیگر کمتر است استفاده از سیمان ۳۸۵ کیلوگرم در متر مکعب بهترین مقاومت را نتیجه می دهد ضمن اینکه با کاهش مقدار سیمان در هزینه هم صرفه جویی می شود و آلودگی محیط زیستی کمتری را در پی دارد.
- ❖ برای هر دسته از طرح های اختلاط که وجه تمایز آنها در دانه بندی است با افزایش نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان، چگالی افزایش و فاکتور هزینه و اسلامپ (که شاخصی از روانی است) کاهش می یابد که این موارد استفاده از نسبت بالاتر حجم سنگدانه به خمیر سیمان را وابسته به هدف مورد نظر در کاربرد و اهمیت هر کدام از این موارد در هدف کاری ما دارد.
- ❖ نتایج تمامی طرح های اختلاط این نکته را ذکر می کنند که استفاده از نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان ۲.۵ بجای ۲ اقتصادی تر است، زیرا در مقاومت فشاری این دو نسبت تفاوت قابل ملاحظه ای مشاهده نمی گردد در عوض هنگامی که از نسبت ۲.۵ استفاده میگردد میزان سیمان مصرفی کمتر میگردد که کاهش هزینه را در پی دارد البته در چگالی افزایش کمی در حدود ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب داریم که چندان تاثیر گذار نیست.
- ❖ حذف لیکای ریز و استفاده از ترکیب لیکای درشت و ماسه به عنوان سنگدانه سبب کاهش مقاومت نگردیده است و

با اینکه حدود ۶۰ درصد حجم سنگدانه را لیکای درشت تشکیل می دهد نه تنها جدا شدگی به وجود نمی آید در مقاومت فشاری در مقایسه با حالت L-I کاهش پیدا نکرده است، ضمن اینکه با حذف لیکای ریز و افزایش لیکای درشت امکان استفاده از ماسه که بسیار ارزانتر از لیکا است فراهم می گردد که ضمن کاهش هزینه می توان مقاومت بالاتری بدست آورد.

- ❖ با حذف لیکای درشت چگالی افزایش می یابد و در پی آن مقاومت بالاتر می رود، که این کار توصیه نمی گردد زیرا هم چگالی، هم هزینه افزایش می یابد، ضمن اینکه با افزایش سطح مخصوص نیاز به خمیر چسبنده بیشتری برای ایجاد پیوستگی و چسبندگی در بتن است که با افزایش سیمان این امر محقق خواهد شد که مطلوب نیست.
- ❖ با افزایش نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان در هر سه دسته طرح روانی کمتر می گردد و برای نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان ثابت کاهش سطح مخصوص ذرات روانی را افزایش می دهد.
- ❖ برای هر دسته از دانه بندی ها با افزایش نسبت حجم سنگدانه به خمیر سیمان هزینه کمتر می گردد.

۸- مراجع و منابع

- ۱- چاندرا ساتیش، برنتسون لیف، (۱۳۸۷)، **بتن سبکدانه**، ترجمه ی دکتر محمد شکرچی زاده و دکتر آرزو امدادی و دکتر نیکلاس علی لیبر، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- رضانیانپور علی اکبر، پیدایش منصور، **شناخت بتن (مصالح، خواص، تکنولوژی)**، جهاد دانشگاهی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۳- فامیلی هرمز، حکیمان بهروز، (۱۳۶۶)، **بتن دانه سبک**، جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

4-American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete", ASTM C330-04

5- ACI Committee 213, "Guide for structural Lightweight-Aggregate concrete", ACI 213R-03