

# بررسی آزمایشگاهی اثر مشترک مقدار ریزدانه، سیمان، و مقاومت فشاری طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی روسازی

## مقاله پژوهشی

مهدی نوابی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

محمدکاظم شربتدار\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

غلامعلی شفابخش، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [msharbatdar@semnan.ac.ir](mailto:msharbatdar@semnan.ac.ir)

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۵

صفحه ۷۴-۵۹

### چکیده

استفاده از بتن غلتکی مطلوب برای روسازی راه زمانی دارای اهمیت بیشتری است که علاوه بر کم کردن هزینه‌های اقتصادی، نیاز به طرح اختلاطی بهینه با مقاومت بالا باشد لذا باید پارامترهایی همچون جنس مصالح سنگی، نوع دانه‌بندی، نوع و میزان سیمان مصرفی و سایر مشخصات مواد تشکیل دهنده بتن مورد بررسی قرار گیرد که در این پژوهش با تغییر در مقدار ریزدانه و سیمان، سعی بر رسیدن به طرح اختلاطی بهینه شده است که به ترتیب مقدار ریزدانه از کل مصالح سنگی در دو محدوده ۱۰۰ تا ۵۰٪ و ۵۰ تا ۰٪ تغییر و مقدار نسبت سیمان به مصالح خشک در محدوده ۱۰٪ تا ۲۲٪ تغییر کرده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که طرح اختلاطی با ۲۴٪ ریزدانه و ۶۶٪ درشت‌دانه دارای دانه‌بندی و سیمان بهینه است که به ترتیب باعث افزایش ۱۲٫۵ و ۱۵٫۰٪ مقاومت فشاری نسبت به حالت مینا شده است. افزایش مقدار سیمان تا حدودی باعث افزایش مقاومت شده ولی افزایش بیش از حد بهینه باعث کاهش مقاومت فشاری شد. ضمناً نتایج نشان داد که با افزایش میزان ریزدانه تا مقدار ۵۰٪، عملیات تراکم بتن غلتکی به حالت مینا (یعنی ۵۰٪ درشت دانه و ۵۰٪ ریزدانه) نزدیک‌تر شده است.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، دانه‌بندی بهینه، سیمان بهینه، مقاومت فشاری

### ۱- مقدمه

و اقتصادی بودن آن نسبت به سایر رویه‌ها یک جاگزین عالی برای پارکینگ و مناطق ذخیره شامل بندرگاه‌ها و تجهیزات نظامی، کناره بزرگراه‌ها، خیابان‌ها و بزرگ راه‌ها است و همچنین می‌تواند در سیستم کامپوزیت یا ترکیبی به عنوان اساس قرار گیرد. در واقع بتن غلتکی با آنکه خواص مقاومتی و اجزای تشکیل دهنده‌ی مشابه بتن معمولی دارد (مانند سنگدانه با دانه‌بندی خوب، مواد سیمانی و آب) اما خواص مخلوط متفاوتی دارد که عمده‌ترین تفاوت بتن غلتکی با بتن معمولی این است که بتن غلتکی درصد بالایی

مهم‌ترین تحول و دستاورد صنعت بتن در چند دهه‌ی اخیر را می‌توان بتن غلتکی به حساب آورد چرا که امکان ساخت سازه‌های فراوان مانند سدها، پل‌ها و جاده‌ها را با استانداردهای فنی و ایمنی مناسب فراهم کرده است (ACI207.5R-11 2011). بتن غلتکی تازه، سخت و اسلامپ آن صفر است که دلیل سختی کافی آن پایدار ماندن در زیر غلتک ارتعاشی است. با این حال به اندازه‌ی کافی و مجاز مرطوب است که در هنگام پخش خمیر، جدا افتادگی سنگدانه‌ها اتفاق نیافتد. از طرفی به دلیل سرعت ساخت بالا

. ژائو و همکاران بر روی دانه‌بندی بتن خود متراکم کار کردند به طوری که چهار نسبت درشت دانه برای دانه‌بندی تعریف کردند و خواص مکانیکی، دوام و نفوذپذیری را مورد آزمایش قرار دادند که نتیجه‌ی تغییر در دانه‌بندی برای مخلوطی که مقدار درشت‌دانه ۵-۱۰ میلی‌متر آن بیشتر بوده با افزایش مقاومت مکانیکی بتن خود متراکم همراه بوده است (Zhao et al 2012). چن و همکاران اثر دانه‌بندی مختلف سنگدانه بر خواص مهندسی بتن سبک را بررسی کرده بودند به این صورت که هم بتن معمولی و هم بتن سبک را در دو حالت دانه‌بندی یکنواخت و دانه بندی غیر یکنواخت (استاندارد) مورد آزمایش قرار دادند که نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری دانه‌بندی یکنواخت را برای بتن سبک و دانه‌بندی غیر یکنواخت را برای بتن معمولی بهتر گزارش کرده بود (Chen and Wu 2018). وینای و همکاران به صورت آزمایشگاهی به بررسی مقاومت فشاری و کششی بتن ژئوپلیمری با دانه‌بندی سنگدانه ریز پرداختند و با دانه‌بندی ریز بتن معمولی مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داده بود که بتن ژئوپلیمری در المان‌های لاغر با دانه‌بندی ریز، مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد (Vinay and Prasad 2016). دونگ و همکاران دو دانه بندی را در مقطع روسازی راه جایگذاری کردند که یکی به صورت بهینه و دیگری به صورت معمولی بود و گزارش کردند که اختلاف نتیجه مقادیر مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته بالا نبوده و تنها مقاومت خمشی در حدود ۹٪ رشد مقاومت داشته است (Kim and Won 2006). لاهوکیک و همکاران به منظور تعیین اثر دانه‌بندی سنگدانه بر رابطه چگالی-رطوبت و خواص مقاومتی بتن غلتکی را با ریزدانه پایین انجام داده بودند رابطه‌ی چگالی-رطوبت بهینه شده برای ۹ مخلوط بتن غلتکی با دانه بندی متفاوت و مقدار سیمان ثابت با استفاده از پروکتور اصلاح شده تعیین شده بود. نتایج مقاومتی در مقایسه با مخلوط کنترلی (بتن معمولی) نشان داد مخلوط‌های بتن غلتکی مقاومت فشاری مشابه و یا حتی بیشتر از بتن معمولی ارائه داده است (LaHucik et al 2016). در ایران هم کارهای تحقیقاتی محدودی بر روی رفتار بتن های غلتکی با دانه بندی و مقادیر متفاوت سیمان انجام شده است تا رفتار این بتن که در روسازی استفاده می‌شود بررسی گردد (Hameli et al, a, b 1397) و (Bagheri et al

سنگدانه ریز برای تراکم بهتر دارد و این موضوع به وضوح در سهم مخلوط بتن غلتکی از سنگدانه‌های درشت و ریز دیده می‌شود که عموماً ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر از بتن معمولی است (Harrington et al 2011, 327R-14 2015). از آنجا که سنگدانه‌ها حدود ۶۰-۷۵ درصد حجم بتن (۷۰-۸۵ درصد وزن بتن) را تشکیل می‌دهد و به شدت در خواص بتن تازه و سخت شده موثر هستند لذا باید سنگدانه‌های آن دارای مشخصات مناسبی از قبیل دانه‌بندی خوب داشته باشد تا بتواند عملکردی بهینه ارائه دهد (ACI 325.10R 2011, Domone and Illston 2011, Cook et al 2015). در گذشته تحقیقات بسیاری بر روی دانه‌بندی بهینه انواع بتن انجام شده بود که به عنوان مثال اشرف و همکاران از طریق تعدادی نمونه آزمایشگاهی بتن معمولی، یک تحلیل تطبیقی از روشها و ابزار متفاوت دانه‌بندی سنگدانه انجام دادند که در نتیجه‌ی آن مقاومت فشاری بیش از ۵۰٪ افزایش داده شده بود و همچنین ثابت شد که خواص بتن مانند کارایی، مقاومت‌ها و غیره بسیار وابسته به سنگدانه ریز نسبت به ترکیب سنگدانه‌ها است (Ashraf and Noor 2011). و همکاران به بررسی اثر اندازه مصالح سنگی بر مقاومت فشاری پرداخته بودند به طوری که چهار اندازه درشت دانه یعنی ۲۵، ۲۰، ۱۲، ۶ را با سه نسبت متفاوت مخلوط کرده است و نتیجه آن مخلوطی با اندازه بزرگترین سنگدانه ۲۰ میلی‌متر بهترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده است (VO EE 2016). کومار و همکاران در مقدار دانه‌بندی بتن معمولی تغییر ایجاد کردند که باعث بهبود مقاومت مکانیکی شده بود (Kumar et al 2018). اکوالو و همکاران پنج دانه‌بندی بتن معمولی را مورد مطالعه قرار دادند که هر کدام از این دانه‌بندی‌ها با حذف یک اندازه از ترکیب دانه‌بندی ایجاد شده بود و نتیجه حاصل از این پژوهش نشان داده بود که حذف یک اندازه از سنگدانه‌ها به تنهایی باعث کاهش یا افزایش نسبی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شده است (Ekwulo and Eme 2017). یولاس و همکاران به بررسی تغییرات دانه‌بندی و ماکزیمم اندازه سنگدانه در کارایی و خواص مقاومتی بتن تقویت شده با الیاف فولادی پرداخته به طوری که مخلوط‌های بتن الیافی با چهار دانه‌بندی متفاوت و دو اندازه سنگدانه بررسی شده و نتایج حاصل نشان داد بود که دانه‌بندی اثرات قابل توجهی بر خواص مقاومتی بتن سخت شده دارد (Ulas et al 2017)

حداقل رساندن جداسدگی طی جابجایی و بتن‌ریزی و همچنین دست‌یابی به یک سطح صاف، بزرگترین قطر اسمی درشت‌دانه مصرفی برای بتن غلتکی ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود (ACI 309.5R 2000). .. از طرفی چنانچه درصد ریزدانه نیز از میزان توصیه شده برای بتن‌های معمولی بیشتر شود احتمال وقوع جداسدگی طی جابجایی و بتن‌ریزی کاهش می‌یابد (Harrington et all 2011). در این پژوهش مصالح مورد استفاده رودخانه‌ای شکسته بوده و همچنین به علت تغییر در مقدار ریزدانه، دانه‌بندی مخلوط بتن در دو قسمت جداگانه و سایر مشخصات فنی مصالح نیز مطابق با استانداردهای مربوطه انجام شده که نتایج آن‌ها در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است (D5821-13 2013, C128-15 2015, C127-15 2015, D2216-10 2011, C131/C131M-14 2015, C535-16 2016, AASTHO T 27 / T 11 (17) 2011, C702/C702M 2011). ضمناً از سیمان پرتلند تیپ ۲ با مشخصات فنی داده شده در جدول ۲ استفاده شد و آب مصرفی برای مخلوط بتن و نگهداری نمونه‌ها نیز آب شرب شهری بوده است.

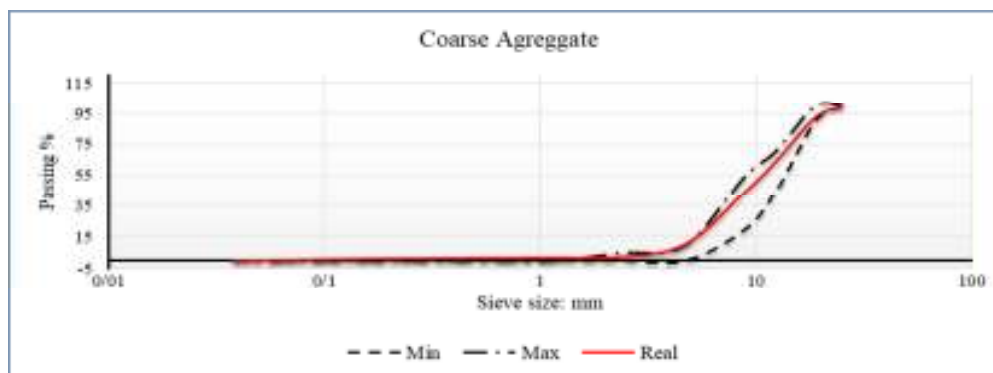
1385). پس از بررسی کارهای محققین پیشین مشاهده شد که مقاومت فشاری رابطه مستقیمی با تغییر دانه‌بندی داشته است و از آنجا که تحقیقات اندکی در خصوص دانه‌بندی بهینه بتن غلتکی شده است لذا در پژوهش حاضر اثر تغییرات ریزدانه و سیمان بر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن غلتکی بررسی شده است تا مقادیر بهینه از دانه‌بندی و مقدار سیمان مصرفی بدست آید.

## ۲- مواد و روش‌ها

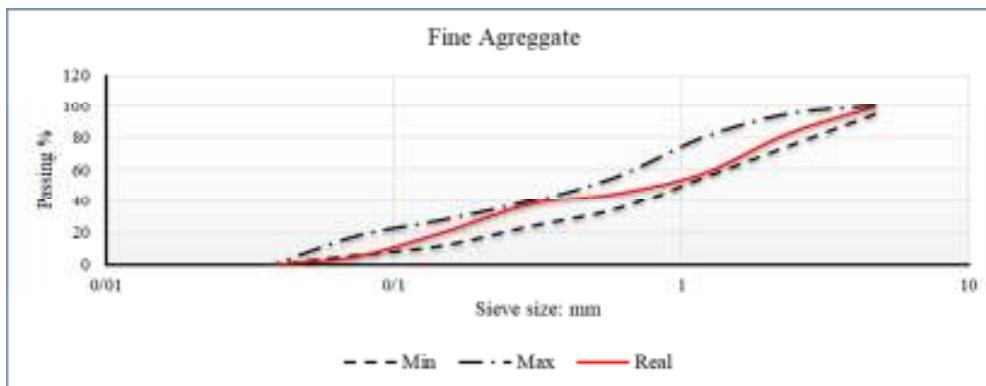
در این پژوهش از دو گروه دانه‌بندی استفاده شده است که یکی به بررسی تغییرات ریزدانه از محدوده‌ی پایین تا میانه یعنی ۰، ۱۷، ۳۴ و ۵۱ درصد و دیگری به بررسی تغییرات ریزدانه از محدوده‌ی بالا تا میانه یعنی ۱۰۰، ۸۳، ۶۶ و ۴۹ درصد پرداخته است از طرفی به ازای هر تغییر در دانه‌بندی، ۵ درصد سیمان متفاوت یعنی ۱۰، ۱۳، ۶، ۱۹ و ۲۲ درصد مورد آزمایش قرار گرفته است تا به ازای هر دانه‌بندی مقدار سیمان بهینه بدست آید و در مجموع تعداد کل طرح اختلاط‌ها ۴۱ عدد شده است. به دلیل درصد آب کم بتن غلتکی، خطر جداسدگی در آن زیاد است لذا به منظور به

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی رودخانه‌ای شکسته

وزن مخصوص SSD (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد جذب آب (%)	درصد رطوبت (%)	هم ارز ماسه (%)	لس آنجلس	درصد شکستگی (%)	اندازه مصالح
2.66	0.46	2.1	-	21.12(A)	65	بادامی
2.63	0.61	1.64	-	21.12(A)	65	نخودی
2.54	2.66	1.88	90	17.2(D)	-	ماسه
2.65	1.21	5.6	65	17.2(D)	-	فیلر



الف- دانه بندی مصالح درشت‌دانه



ب- دانه بندی مصالح ریزدانه

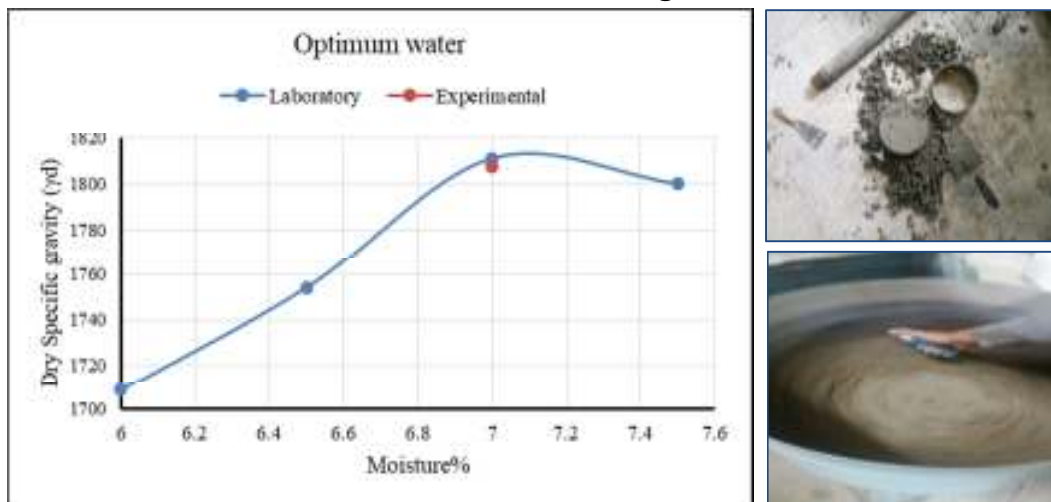
شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی

جدول ۲. مشخصات فنی سیمان پرتلند تیپ ۲ جوین

خصوصیات شیمیایی			خصوصیات فیزیکی			
ترکیبات	مطابق با ISIRI389	تولیدی جوین	مشخصه فیزیکی	مطابق با ISIRI389	تولیدی جوین	
SiO <sub>2</sub>	۲۰ (حداقل)	20.9	(cm <sup>2</sup> /gr) نرمی (بلین)	۲۸۰۰ (حداقل)	3780	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶ (حداکثر)	4.78	Cao آزاد	*	1.30	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶ (حداکثر)	3.72	تولید حباب	۰,۸ (حداکثر)	0.2	
CaO	*	62.6	تست گیرش	اولیه (دقیقه)	۴۵ (حداقل)	105
Mgo	۵ (حداکثر)	2.24		ثانویه (ساعت)	۶ (حداکثر)	3:10
L.O.I	۳ (حداکثر)	1.64	مقاومت	۳ روزه	۱۰۰ (حداقل)	330
I.R	۰,۷۵ (حداکثر)	0.38	فشاری	۷ روزه	۱۷۵ (حداقل)	412
C <sub>3</sub> S	*	50.7	(Kg/Cm <sup>2</sup> )	۲۸ روزه	۳۱۵ (حداقل)	515
C <sub>2</sub> S	*	21.73	خمش ناشی از فشار	۳ روزه	*	48
C <sub>3</sub> A	۸ (حداکثر)	6.37		۷ روزه	*	56
SO <sub>3</sub>	۳ (حداکثر)	2.74		۲۸ روزه	*	68

به طور معمول دو روش برای طرح اختلاط بتن های غلتکی تحت تاثیر قرار دهد) کار دشواری بود لذا نیاز به روشی دیگر وجود دارد یکی روش رطوبت بهینه بر مبنای روش تراکم خاکها و دیگری روش کارایی و روانی است که در این پژوهش از روش تراکم خاکها استفاده شده و در چارچوب ضوابط کلی ACI 211.3R انجام شده است (2002-02-211.3R). در روش تراکم خاکها ابتدا باید آب بهینه مخلوط با استفاده از استاندارد ASTM D1557 بدست آورده شود. تخمین زدن آب بهینه در این پژوهش به خاطر تعداد زیاد طرح اختلاطها، دستی بودن پروکتور اصلاح شده و طولانی بودن دوره ساخت نمونه ها (که به خودی خود می تواند رطوبت مصالح سنگی را

درستی از مقدار آب بهینه رسیده شد. گفتنی است تعداد کل می‌شد تعداد کل پروکتور اصلاح شده معادل ۱۳۳۲ می‌شد که نمونه‌ها در این پژوهش ۳۳۳ عدد می‌باشد که چنانچه به ازای هر نمونه از ۴ درصد رطوبت برای پروکتور اصلاح شده استفاده ممکن بود.



شکل ۲. یک مثال از بدست آوردن آب بهینه با استفاده از پروکتور اصلاح شده و حالت تجربی با اسپری

نهایت حرف پنجم عددی صحیح است که درصد سیمان استفاده شده در طرح اختلاط را نشان می‌دهد. نام‌گذاری طرح اختلاط‌های ۲۲ تا ۴۱ مشابه گروه قبلی است با این تفاوت که به جای حرف G از F استفاده شده است و برگرفته از ابتدای کلمه دانه‌بندی ریز که نشان دهنده‌ی بافت ریز این گروه است. علت دسته‌بندی ۴۱ طرح اختلاط در دو گروه، به خاطر تغییرات ریزدانه است به طوری که برای گروه G مقدار ریزدانه از پایین به وسط در حال تغییر است تا به زیرگروه ۴ یعنی بتن غلتکی برسد و از آنجا که مقدار درشت‌دانه در این گروه بیشتر است لذا بافت بتن درشت‌تر خواهد شد از طرفی برای گروه F نیز مقدار ریزدانه از بالا به وسط در حال تغییر است تا به زیرگروه ۸ یعنی بتن غلتکی برسد و این یعنی مقدار ریزدانه در این گروه بیشتر است در نتیجه بافت بتن ریزتر خواهد شد و احتمال افزایش مقاومت خمشی وجود دارد.

پس از آنکه مقادیر آب بهینه بدست آمد می‌توان ۴۱ طرح اختلاط که شامل ۸ تیپ دانه‌بندی و ۵ نوع درصد متفاوت سیمان به ازای هر طرح اختلاط را آماده کرد که در دو گروه و در جدول ۳ آورده شده است. نام‌گذاری طرح اختلاط بر اساس ویژگی‌های کلی هر کدام بوده است به طوری که حرف R از ابتدای کلمه‌ی بتن غلتکی گرفته شده است حرف G برای گروهی که شامل طرح اختلاط ۱ تا ۲۱ است و از ابتدای کلمه دانه‌ای (دانه‌ریز) گرفته شده و دلیل آن تغییرات ریزدانه با فاصله‌ی ۱۷٪ از یکدیگر است و این یعنی زیر گروه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مقدار ریزدانه‌ی ۰، ۱۷، ۳۴ و ۵۱ درصد دارند که نشان دهنده‌ی بافت درشت این گروه است. پارامتر سوم عددی صحیح است که در واقع بیانگر مقدار سهم درشت‌دانه در طرح اختلاط است و به خاطر درشت بودن بافت این گروه انتخاب شده است حرف C برگرفته از ابتدای حرف سیمان است و در

جدول ۳. طرح اختلاط برای گروه‌های G و F

Grouping	Sub group	Mix name	Combined percentage of aggregates		Cement %	Cement Weight kg/m <sup>3</sup>	Optimum moisture (%)	Moisture of aggregates (%)	Total water kg/m <sup>3</sup>	Coarse aggregate (CA) (kg)	Fine aggregate (FA) (kg)
			Fine	Coarse							
G	1	RG100C10	0	100	10	229.07	4.5	1.82	144.85	2646	0
		RG100C13			13	295.5	5	1.82	155.12	1977.8	0
		RG100C16			16	361	5.5	1.82	165.23	1895.3	0
		RG100C19			19	425.5	6	1.82	175.2	1814	0
		RG100C22			22	489	6.5	1.82	185.01	1733.8	0

				25	558	6.5	1.82	186	1674	0
				10	219.9	6	1.88	173.33	1643	336.5
				13	287.1	6	1.88	174.03	1594.7	326.6
	2			16	350.8	6.5	1.88	183.75	1528.7	313.1
		17	83	19	418.3	6.5	1.88	184.5	1480.1	596.2
				22	480.9	7	1.88	194.12	1415.1	289.8
				10	218.16	6	1.93	173.51	1298.4	668.9
				13	282.2	6.5	1.93	183.17	1246.5	642.1
	3			16	334.9	7	1.93	192.69	1195.3	615.7
		34	66	19	411.3	7	1.93	193.49	1157.4	596.2
				22	473	7.5	1.93	202.92	1106.9	570.2
				10	214.9	6.5	1.99	182.54	947.61	986.3
				13	277.5	7	1.99	192	909.95	947.1
	4*			16	339.27	7	1.99	192.82	822.33	918.3
		51	49	19	400.2	8	1.99	210.55	836.1	870.2
				22	465.4	8	1.99	211.44	808.53	841.5
				10	200.41	9	2.16	215.9	0	1803.7
				13	261.69	9	2.16	224.7	0	1751.3
	5			16	320.21	9.5	2.16	225.7	0	1681.1
		100	0	19	378.06	10	2.16	226.7	0	1611.7
				22	439.69	10	2.16	235.5	0	1505.6
				10	203.64	8.5	2.10	199.7	311.56	1521.2
				13	263.14	9	2.10	208.8	299.37	1461.6
	6			16	325.26	9	2.10	209.7	290.3	1417.3
		83	17	19	387.93	9	2.10	218.7	281.15	1108.9
				22	446.48	9.5	2.10	219.7	269.11	1313.9
				10	209.18	7.5	2.05	191.2	640.09	1242.5
				13	270.21	8	2.05	200.5	614.84	1193.5
	7			16	334	8	2.05	201.3	596.19	1157.3
		66	34	19	394.12	8.5	2.05	210.5	571.27	1108.9
				22	458.31	8.5	2.05	211.4	552.47	1072.4
				10	212.7	7	1.98	182.54	976.28	938
				13	274.69	7.5	1.98	192	937.52	900.76
	8*			16	339.5	7.5	1.98	192.82	909.01	873.36
		49	51	19	400.51	8	1.98	210.55	870.79	836.64
				22	465.69	8	1.98	211.44	942.06	809.04

\*The percentage of the gradation of fine aggregate and coarse aggregate in this subgroup is similar and equal to the gradation of roller compacted concrete, so it is considered as a criterion gradation.

مقاومت افزایش خواهد داد. از میان طرح اختلاطها که در گروه G هستند آن دسته از مقدار بهینه اضافه شده است. از میان طرح اختلاطها که در گروه F هستند آن دسته از طرح اختلاطها که میزان ریزدانه در زیرگروه دانه‌بندی (نوع ۵ و ۶) آن‌ها زیاد است نسبت به طرح اختلاطهایی که میزان ریزدانه در متغیر دانه‌بندی آن‌ها کم است دارای بافت ریزتر هستند که با افزایش مقدار سیمان، شکست این مخلوط‌ها ترد و شکل ترک در نمونه‌ها نیز همانند گروه G از بالا یا پایین شروع و در طول استوانه کشیده شده است که در شکل (۳-ب) این موضوع قابل رویت است. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌ها تا مقدار بهینه اضافه شده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در دو شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده که به ترتیب اثر سیمان و اثر ریزدانه را بررسی کرده است.

شکل ۴ در واقع حاصل ثابت گرفتن مقادیر ریزدانه و به ازای هر تغییر در دانه‌بندی رسم شده است. روند رشد مقاومت فشاری در این نمودارها به گونه‌ای است که با افزایش مقدار سیمان، این روند صعودی تا رسیدن به نقطه‌ی اوج ادامه داشته است و سپس

پس از محاسبه‌ی طرح اختلاط و بر اساس تعداد نمونه‌های تعریف شده، مخلوط مورد نیاز ساخته شده و بتن غلتکی در نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C39 در سه‌لایه و مطابق با استاندارد ASTM C1176 تحت وزنه‌ی ۹/۱ کیلوگرمی روی میز ارتعاشی مترکم گردید (C1176/C1176M 2013, C39/C39M-16b (2016)). نمونه‌ها بعد از گذشت ۲۴ ساعت، درون آب با دمای ۲۳ درجه به مدت ۲۸ روز قرار گرفته بود تا زیر جک هیدرولیکی شکسته شود.

### ۳- تحلیل و بررسی نتایج

محدوده‌ی مقاومت فشاری بتن غلتکی به طور معمول بین ۲۸ تا ۴۱ مگاپاسکال است و این در حالی است که در بعضی پروژه‌ها تا ۴۸ مگاپاسکال نیز رسیده است به هر حال ساخت و ساز عملی و ملاحظات هزینه احتمالاً ضخامت را نسبت به

شروع به کاهش می‌کند. این روند برای تمامی هشت زیرگروه دانه‌بندی به جز زیرگروه دانه‌بندی یک صادق است که تضاد رفتار زیرگروه دانه‌بندی یک به دلیل عدم وجود ریزدانه در مخلوط‌ها بوده و سیمان نقش ملاتی را بازی کرده که ناشی از حذف ریزدانه است بنابراین می‌توان گفت به ازای هر تغییر در دانه‌بندی، مقدار سیمان بهینه‌ای وجود خواهد داشت که مصرف بیش از این مقدار، تاثیر منفی بر مقاومت فشاری دارد (در زیرگروه دانه‌بندی یک به دلیل اینکه مقاومت فشاری حاصل از دو مقدار نسبت سیمان ۲۲ و ۲۵ درصد تقریباً نزدیک یکدیگر است لذا به لحاظ اقتصادی مقدار نسبت سیمان کمتر به عنوان سیمان بهینه معرفی شده است) که در شکل ۵ مقادیر سیمان بهینه به صورت نمودار ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود از هشت مخلوط با سیمان بهینه (شامل تنها یک مخلوط از هر دانه‌بندی) تقریباً ۶۲/۵ درصد آن‌ها دارای نسبت سیمان به مصالح خشک ۱۹ و ۱۲٫۵ درصد آن‌ها دارای نسبت سیمان به مصالح خشک ۲۲٪ است که این نسبت‌ها بیشتر و خارج از محدوده‌ی تعریف شده آیین‌نامه‌ی ACI است و همچنین ۲۵ درصد دیگر مخلوط‌ها که شامل دو مخلوط از زیرگروه دانه‌بندی ۴ و ۸ است دارای نسبت سیمان به مصالح خشک ۱۶ درصد هستند که جزء نسبت‌های بالا در محدوده آیین‌نامه ACI محسوب می‌شود از طرفی دانه‌بندی این دو مخلوط نیز در محدوده دانه‌بندی بتن غلتکی ACI بوده است (327R-14 است (2015).

که مقدار ریزدانه‌ی آنها بیش از ۵۰ درصد وزن مصالح بوده است همواره مقاومت فشاری کمتری از خود نشان داده است که دلیل آن می‌تواند افزایش ملات بیش از مقدار لازم باشد. در واقع چنانچه مقدار ملات مخلوط بتنی مناسب باشد ملات نقش چسبندگی مصالح سنگی، پر کردن حفرات و تراکم بهتر در بتن غلتکی را ایفا می‌کند و زمانی که نیرو به نمونه‌ی بتنی وارد شود انتقال نیرو از طریق اسکلت سازه‌ای بتن یعنی مصالح سنگی درشت‌دانه انجام شده است و در نتیجه‌ی آن باعث افزایش مقاومت خواهد شد که در گروه G به وضوح قابل رویت است و در مقابل زمانی که ملات بیش از مقدار لازم باشد علاوه بر پر کردن حفرات باعث جدا افتادگی بین مصالح سنگی شده و زمانی که نیرو به نمونه‌ی بتنی وارد شود انتقال نیرو به جای اسکلت سازه‌ی بتن از طریق ملات انجام شده است و در نتیجه باعث شکست زود هنگام بتن و کاهش مقاومت خواهد شد که در گروه F به وضوح قابل رویت است (Nmai 1999). همچنین با در نظر گرفتن مقدار سیمان ثابت مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ریزدانه می‌توان به دانه‌بندی بهینه دست یافت که در شکل ۷ به ازای هر درصد سیمان، تغییرات ریزدانه کشیده شده است که مشاهده می‌شود دانه‌بندی با مقدار ریزدانه ۳۴ درصد بهترین عملکرد را از خود نشان داده است به طوری که به ازای هر درصد سیمان بیشترین مقدار تنش فشاری را تحمل کرده است.

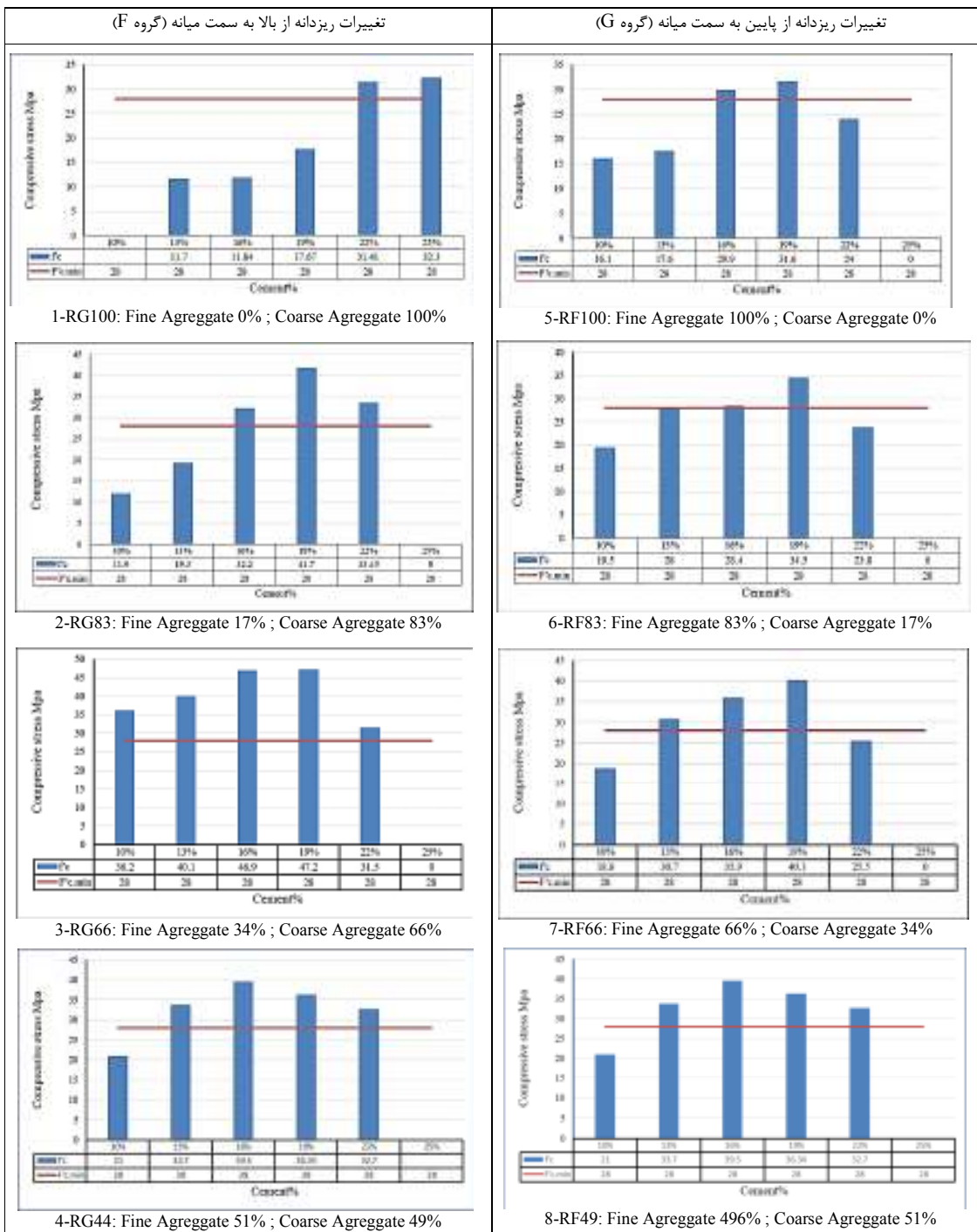
حال چنانچه مقدار سیمان برای هشت زیرگروه دانه‌بندی ثابت در نظر گرفته شود در این صورت مطابق شکل ۶ مخلوط‌های



ب- گروه F

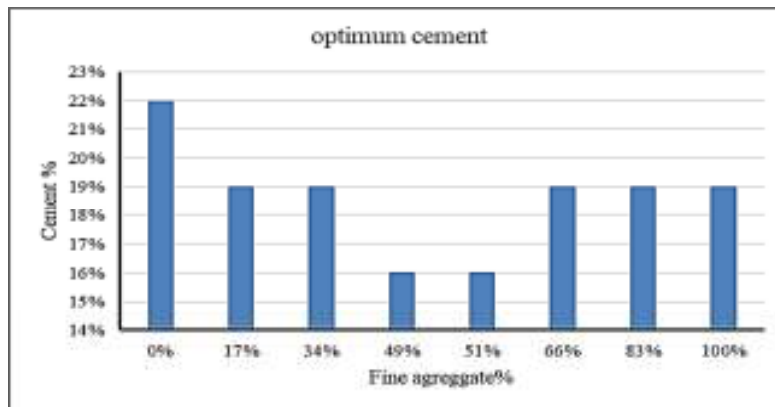
الف- گروه G

شکل ۳. نحوه‌ی شکست و ایجاد ترک در نمونه‌های استوانه‌ای



شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری به ازای تغییرات ریزدانه



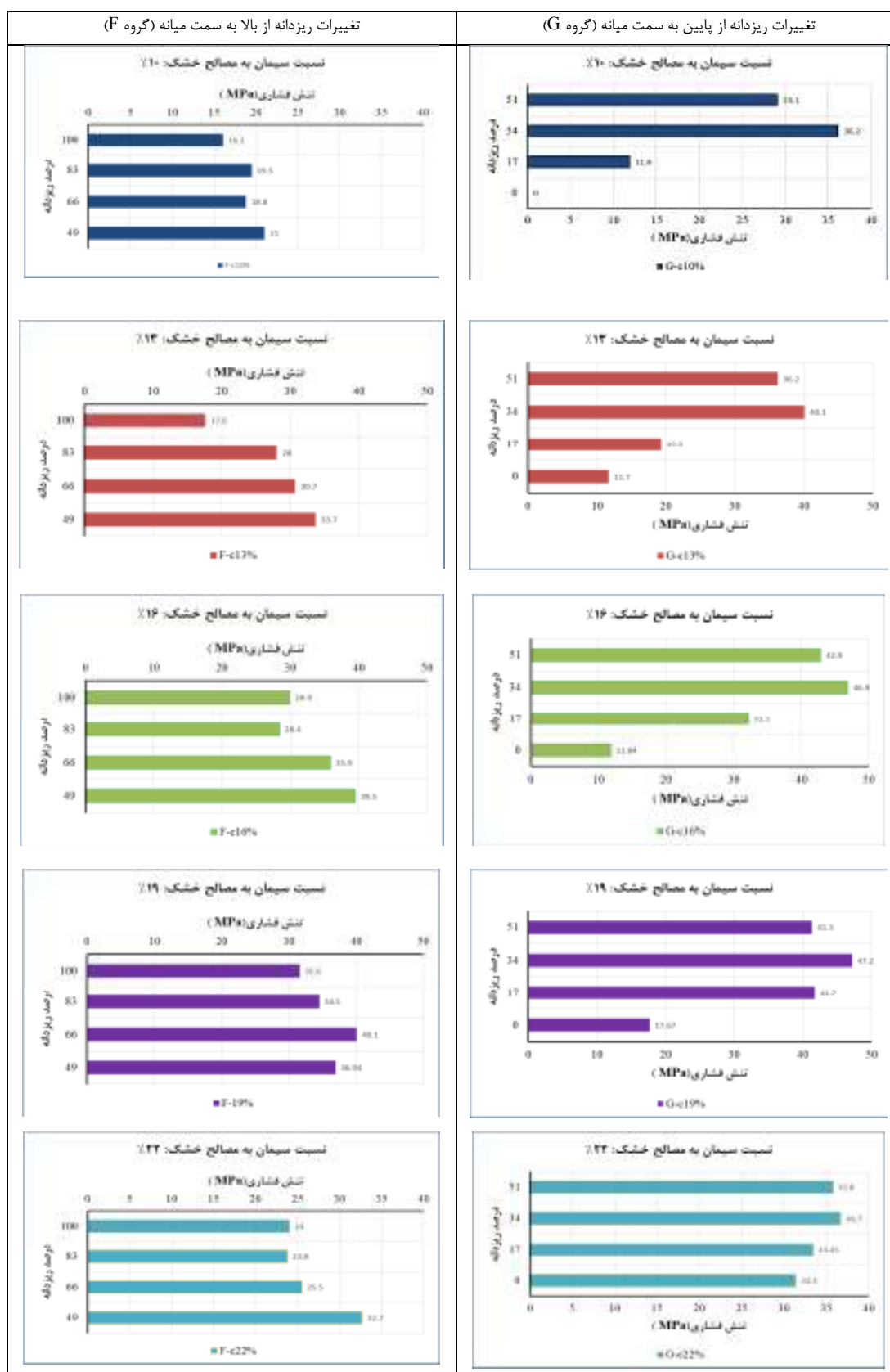


شکل ۵. مقادیر سیمان بهینه به ازای هر تغییر در دانه بندی

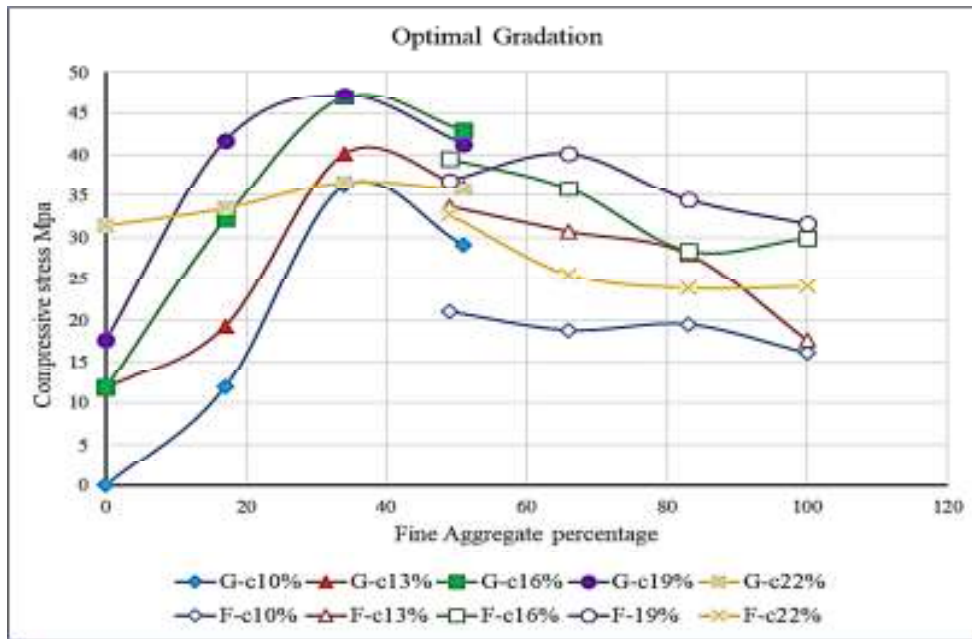
جدول ۴. نتایج مقاومت فشاری بتن غلتکی بدون الیاف (گروه G)

Grouping		Mix name	average compressive strength ( $f'_c$ )	$f'_c/f'_{c,cs}$	Average density ( $\gamma$ )	$\gamma_i/\gamma_{cs}$
Group	Subgroup		MPa		$g/cm^3$	
G	4 (Control) (Sample)	RG49c10	29.1	1	2.40	1
		RG49c13	36.2	1	2.43	1
		RG49c16	42.9	1	2.38	1
		RG49c19	41.3	1	2.41	1
		RG49c22	35.8	1	2.40	1
		RG100c10	This mix design was removed due to lack of proper slump			
	1	RG100c13	11.7	0.32	2.1	0.86
		RG100c16	11.84	0.32	1.99	0.84
		RG100c19	17.67	0.42	2.14	0.89
		RG100c22	31.41	0.88	2.28	0.95
		RG100c25	The reference is not made with 25% cement ratio, so this is not comparable to the reference			
	2	RG83c10	11.9	0.4	2.15	0.89
		RG83c13	19.3	0.53	2.31	0.95
		RG83c16	32.2	0.88	2.3	0.96
		RG83c19	41.7	1	2.4	0.99
		RG83c22	37.98	1.06	2.50	1.06
	3	RG66c10	36.2	1.24	2.43	1.012
		RG66c13	40.1	1.10	2.47	1.016
		RG66c16	46.9	1.28	2.51	1.055
		RG66c19	47.2	1.14	2.50	1.037
		RG66c22	31.5	0.88	2.4	1.021

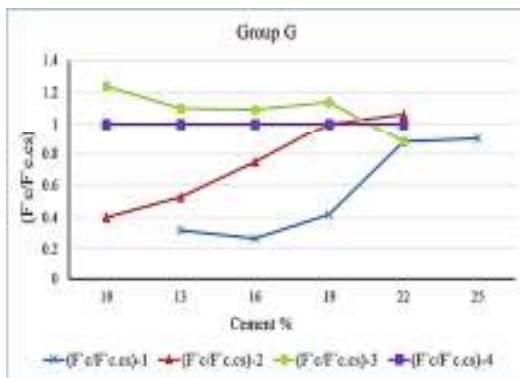
\*The percentage of the gradation of fine aggregate and coarse aggregate in this subgroup is similar and equal to the gradation of roller compacted concrete, so it is considered as a criterion gradation.



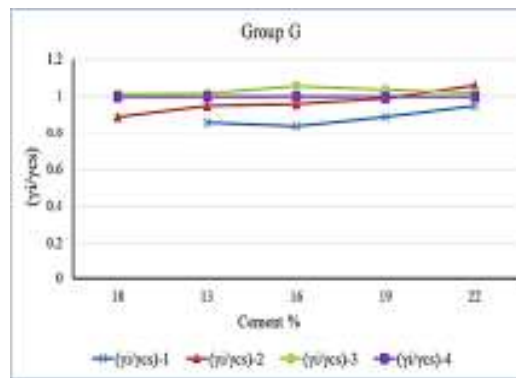
شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری به ازای مقادیر ثابت سیمان



شکل ۷. اثر تغییرات دانه بندی با در نظر گرفتن سیمان ثابت



ب- تغییرات تنش نسبت به حالت مینا



الف- تغییرات چگالی نسبت به حالت مینا

شکل ۸. نسبت تغییرات تنش و چگالی در گروه G

نتیجه باعث نزدیک شدن نسبت تنش به حالت مینا شده است از طرفی تنها زیرگروه دانه بندی که مقدار تنش آن از مینا بیشتر بوده است مربوط به زیرگروه دانه بندی ۳ است که نشان از دانه بندی مناسب آن دارد. بر خلاف تغییرات زیاد در نسبت تنش زیرگروه دانه بندی‌ها، نسبت چگالی آن‌ها تغییر نسبتاً کمی داشته است و نشان می‌دهد که هر چه مقدار ریزدانه در حال افزایش بوده نسبت چگالی به حالت مینا نزدیک‌تر شده است و این یعنی تراکم بهتر انجام شده است. مطابق جدول ۵ و شکل ۹ در گروه F نیز همانند گروه G تغییرات نسبت تنش زیاد بوده ولی در مقایسه با گروه G از تغییرات کمتری برخوردار است و همچنین نسبت تنش تقریباً از مقدار مینا پایین‌تر بوده که دلیل عمده‌ی آن

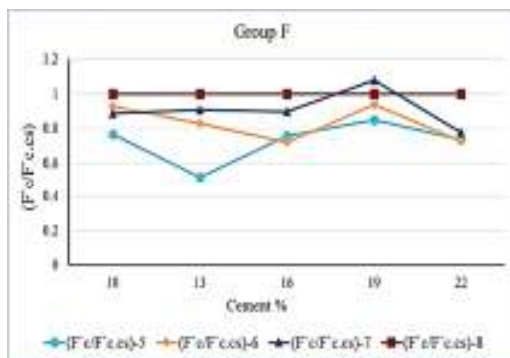
بر اساس منابع موجود (FHWA-HIF-16-003 2016)، زیرگروه دانه بندی ۴ و ۸ که تقریباً دارای ۵۰٪ درشت‌دانه و ۵۰٪ ریزدانه است در محدوده‌ی دانه بندی بتن غلتکی تعریف شده است لذا در این پژوهش به عنوان مینا در نظر گرفته شده و نسبت تنش و نسبت چگالی سایر مخلوط‌ها نسبت به این دو زیرگروه دانه بندی سنجیده شده است که برای گروه G، تغییرات نسبت تنش و چگالی در شکل ۸ و جدول ۴ به نمایش درآمده است. بر اساس نتایج گروه G می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات تنش نسبت به حالت مینا زیاد بوده و دلیل آن تغییر مقدار ریزدانه و سیمان در زیرگروه دانه بندی‌ها است و این یعنی با افزایش هر دو پارامتر مقدار ملات مخلوط بتن غلتکی افزایش داشته و در

وجود مقدار ریزدانه بیش از مقدار مناسب در مخلوط‌های بتن ریزدانه در تراکم دارد چرا که در مقایسه با گروه G، این گروه غلظتی است. از طرفی بر خلاف این تغییرات زیاد تنش، تغییرات نسبت چگالی پایین‌تری دارد. نسبت چگالی بسیار کم بوده و این دلیل قاطعی بر اثبات اثر

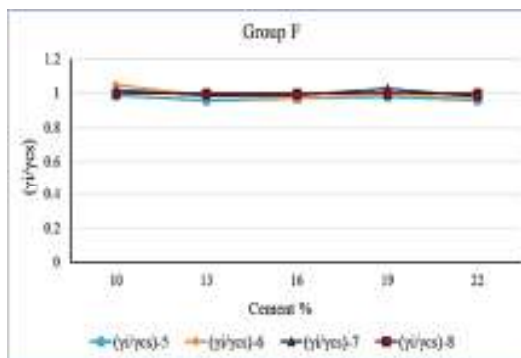
جدول ۵. نتایج مقاومت فشاری بتن غلظتی بدون الیاف (گروه F)

Grouping		Mix name	average compressive strength ( $f'_c$ )	$f'_c/f'_{c,cs}$	Average density ( $\gamma$ )	$\gamma_i/\gamma_{cs}$
Group	Subgroup		MPa		$g/cm^3$	
F	8*	RF49c10	21	1	2.25	1
		RF49c13	33.7	1	2.34	1
		RF49c16	39.5	1	2.36	1
		RF49c19	36.94	1	2.31	1
		RF49c22	32.7	1	2.38	1
	5	RF100c10	16.1	0.77	2.24	0.99
		RF100c13	17.6	0.52	2.26	0.96
		RF100c16	29.9	0.76	2.3	0.97
		RF100c19	31.6	0.85	2.28	0.98
		RF100c22	24	0.74	2.285	0.96
	6	RF83c10	19.5	0.93	2.35	1.05
		RF83c13	28	0.83	2.32	0.99
		RF83c16	28.4	0.72	2.30	0.97
		RF83c19	34.5	0.94	2.32	1
		RF83c22	23.8	0.73	2.31	0.97
	7	RF66c10	18.8	0.89	2.29	1.02
		RF66c13	30.7	0.91	2.33	0.99
		RF66c16	35.9	0.90	2.35	0.99
		RF66c19	40.1	1.08	2.37	1.026
		RF66c22	25.5	0.78	2.33	0.98

\*The percentage of the gradation of fine aggregate and coarse aggregate in this subgroup is similar and equal to the gradation of roller compacted concrete, so it is considered as a criterion gradation.



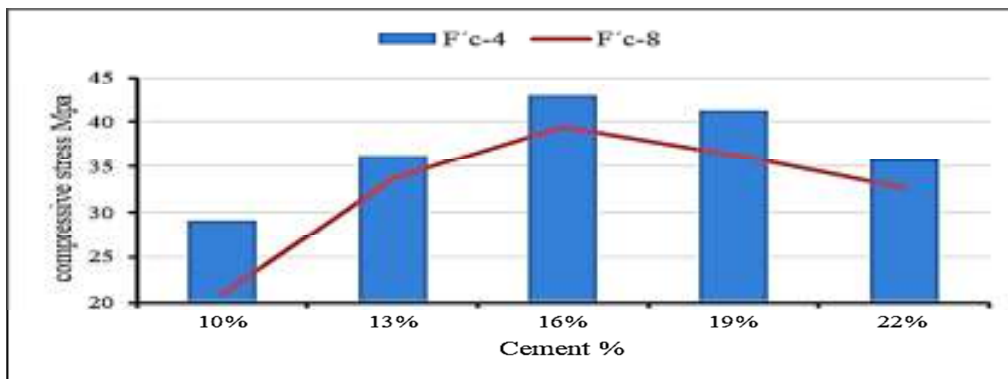
ب- تغییرات تنش نسبت به حالت مینا



الف- تغییرات چگالی نسبت به حالت مینا

شکل ۹. نسبت تغییرات تنش و چگالی در گروه F

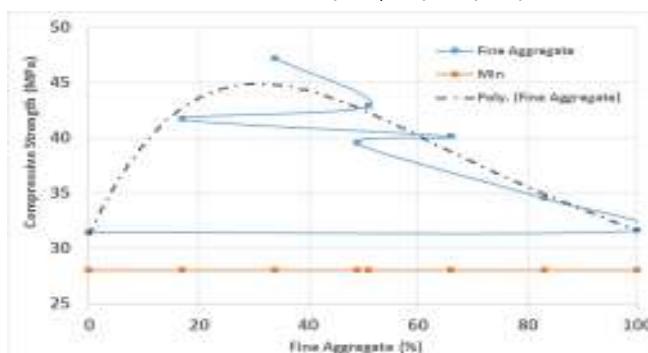
نکته قابل توجه در خصوص دو زیرگروه دانه‌بندی ۴ و ۸ از دو گروه F و G، نزدیکی دانه‌بندی آنها به یکدیگر است به طوری که اختلاف درصد مشارکت مصالح در آنها به ۲٪ می‌رسد ولی با این حال نتایج مقاومتی آنها بیش از ۱۰ درصد اختلاف دارد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است و بیانگر آن است که نقش ریزدانه در حالتی که سهم مشارکتش از میانه عبور کند بسیار مهم است چراکه با افزایش ۲٪ از سهمش نسبت به مصالح سنگی می‌تواند مقاومت فشاری را در حدود ۱۰٪ کاهش دهد.



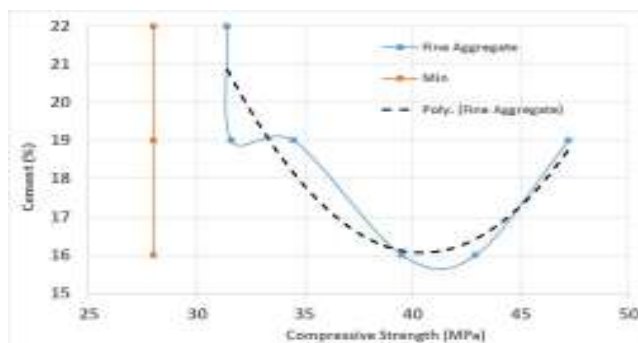
شکل ۱۰. مقایسه مقاومت فشاری مخلوط‌های مینا از هر دو گروه

### ارائه طرح اختلاط بهینه

برای آنکه یک طرح اختلاط بهینه ارائه شود پارامترهای متغییر در پژوهش باید به صورت همزمان با یکدیگر در نظر گرفته شود لذا نمودارهایی مطابق داده‌های جدول ۶ رسم شده است که در آن‌ها مقاومت فشاری به عنوان معیار مشترک برای هر دو پارامتر دانه‌بندی و سیمان، ثابت بوده و دو پارامتر دیگر نسبت به آن دسته‌بندی و رسم شده است همچنین طرح اختلاط‌های انتخابی به ازای سیمان بهینه از هر دانه‌بندی است که در بخش ۳ مقادیر آن بدست آمده بود.



الف- تغییرات ریزدانه مخلوط‌های بهینه



ب- تغییرات سیمان مخلوط‌های بهینه

شکل ۱۱. نتایج طرح اختلاط با مقدار سیمان بهینه به ازای هر دانه‌بندی

خشک حاصل شده است و دلیل آن سیمان بهینه، مقاومت فشاری بالا و ریزدانه تقریباً پایین آن است.

نمودارهای رسم شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که بهترین مقاومت بدست آمده مربوط به مخلوط RG66c19 با ۳۴٪ سهم ریزدانه از مصالح سنگی و ۱۹٪ نسبت سیمان به مصالح

جدول ۶. نتایج طرح اختلاط ها با مقدار سیمان بهینه به ازای هر دانه بندی

Row	Mix name	F'c (MPa)	F'c-min (MPa)	Fine aggregate (%)	Cement (%)
1	RG100c22	31.41	28	0	22
2	RF100c19	31.6	28	100	19
3	RF83c19	34.5	28	83	19
4	RF49c16	39.5	28	49	16
5	RF66c19	40.1	28	66	19
6	RG83c19	41.7	28	17	19
7	RG49c19	42.9	28	51	16
8	RG66c19	47.2	28	34	19

## ۵- نتیجه گیری

- افزایش مقدار سیمان تا بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری خواهیم داشت:
- افزایش مقدار ریزدانه تا مقدار ۳۴٪ حجم مصالح سنگی اثر مثبتی بر مقاومت فشاری داشته است و سپس تا مقدار ۱۰۰٪ ریزدانه همواره اثر منفی بر مقاومت مقدار بهینه اثر مثبتی بر مقاومت فشاری داشته است و بیشتر از مقدار بهینه روند نزولی به خود گرفته و تاثیر منفی بر مقاومت فشاری دارد.
- بهترین مقاومت فشاری ۴۷٫۲ مگاپاسکال است که مربوط به طرح اختلاطی از گروه G و زیر گروه دانه بندی شماره ۳ یعنی ۳۴٪ ریزدانه و ۶۶٪ درشت دانه می باشد.
- سیمان بهینه برای هشت زیرگروه دانه بندی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ به ترتیب ۲۲، ۱۹، ۱۹، ۱۹، ۱۹، ۱۹، ۱۶٪ است که به طور تقریبی ۶۲٫۵ درصد مخلوط های بهینه دارای سیمان بهینه ۱۹٪ هستند.
- زمانی که سهم ریزدانه از مصالح سنگی در حالتی نزدیک به میانه است با افزایش سهم ریزدانه تا ۲٪، مقاومت فشاری به بیش از ۱۰ درصد کاهش داشته است.
- مقدار ریزدانه نقش بسیار موثری در تراکم نمونه های بتن غلتکی دارد به طوری که با افزایش آن تا مقدار ۵۰٪، عملیات تراکم نمونه ها به حالت مینا (یعنی ۵۰٪ درشت دانه و ۵۰٪ ریزدانه) نزدیکتر شده است و با افزایش ریزدانه از مقدار ۵۰ تا ۱۰۰ درصد عملیات تراکم نمونه ها از حالت مینا فاصله گرفته است.

## ۶- مراجع

- باقری، ع.ر.، محمودیان، م.، فخری، م.، (۱۳۸۵)، "تاثیر عمل آوری بر خواص بتن غلتکی روسازی راه با و بدون دوده سیلیس"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۳، ص. ۱۴۷ تا ۱۶۲.
- عاملی، ع.ر.، پرورش کاران، ا.، هاشمی، س.ا.ح.، (۱۳۹۷)، "تاثیر استفاده از مصالح بازیافتی در خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۵، ص. ۲۷۱ تا ۲۹۶.
- عاملی، ع.ر.، پرورش کاران، ا.، هاشمی، س.ا.ح.، (۱۳۹۷)، "بررسی عملکرد و مشخصات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی (RCC) حاوی مقادیر بالای خاکستر بادی، خرده لاستیک بازیافتی و نانوسیلیس با استفاده از بهینه سازی سطح پاسخ"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۶، ص. ۳۸۱ تا ۳۹۵.
- American Concrete Institute, (2011), "207.5R-11. Roller-compacted mass concrete,".
- American Concrete Institute, (2015), "327R-14, Guide to Roller-Compacted Concrete Pavements,".
- American Concrete Institute, (2011), "ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001), Report on Roller-Compacted Concrete Pavements,".
- American Concrete Institute, (2000), "ACI 309.5R-00. Compaction of Roller-Compacted Concrete,".
- American Society for Testing and Materials, (2013), "D5821-13. Standard Test Method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate,".
- American Society for Testing and Materials, (2015), "C128-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate,".
- American Society for Testing and Materials, (2015), "C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate,".
- American Society for Testing and Materials, (2010), "D2216-10. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass,".
- American Society for Testing and Materials, (2015), "C131/C131M-14. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine,".

- Pavement,” International organization of Scientific Research, Vol. 07, No. 10, pp. 79–89.
- Federal Highway Administration, (2016), “FHWA-HIF-16-003. Roller-Compacted Concrete Pavement,” .
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W. and Hazaree, C., (2011), "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements", No.1.
- Kim, D.H. and Won, M. C., (2006), “Pilot Implementation of Optimized Aggregate Gradation for Concrete Paving” .
- Kumar, D. S., Narasimhul, P. A. K., Kumar, M. P., and Pradesh, A., (2018), “Optimization of Aggregate Gradation and its Effects on Properties of Normal Strength Concrete (M20),” International Journal for Scientific Research & Development, Vol. 6, No. 02, pp. 3041–3048.
- LaHucik, J., Roesler, J., and Pavements, H., (2015), “Low Fines Content Roller-Compacted Concrete,” Airfield and Highway Pavements 2015, Vol. 4, pp. 441–452.
- Nmai, C. K., (1999), “ACI Education Bulletin E1-99,”.
- Ulas, M. A., Alyamac, K. E. and Ulucan, Z. C., (2017), “Effects of aggregate grading on the properties of steel fibre-reinforced concrete,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 246, No. 1.
- Vinay, M. L. G. G., Prasad, K.S., (2016), “Effect of Gradation of Coarse Aggregate on Strength Properties of Geopolymer Concrete,” International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, pp. 14879–14886.
- VO, O. and EE, A., (2016), “Effects of Aggregate Gradation on the Properties of Concrete Made From Granite Chippings,” Journal of Steel Structures & Construction, Vol. 2, No. 1, pp. 2–4.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X., and Gao, B., (2012), “The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete,” Materials and Design, Vol. 40, pp. 109–116.
- American Society for Testing and Materials, (2016), “C535-16. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine,”.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, (2011), “ASTHO T 27 / T 11 (17). Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,”.
- American Society for Testing and Materials, (2011), “C702/C702M -11. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size,”.
- American Concrete Institute, (2002), “211.3R-02. Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete,”. American Society for Testing and Materials, “C1557-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using,”.
- American Society for Testing and Materials, (2013), “C1176/C1176M-13. Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table,”.
- American Society for Testing and Materials, (2016), “C39/C39M-16b. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,”.
- Ashraf, W. B. and Noor, M. A., (2011), “Performance-evaluation of concrete properties for different combined aggregate gradation approaches,” Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 2627–2634.
- Cook, M.D., Seader, J.N., Ley, M.T., (2015), “Investigation of optimized graded concrete for oklahoma-phase 2,” Final report, Oklahoma Department of Transportation, pp. 156.
- Chen, H.-J. and Wu, C.-H., (2018), “Influence of Aggregate Gradation on the Engineering Properties of Lightweight Aggregate Concrete,” Applied Sciences, Vol. 8, No. 8, pp. 1324.
- Domone, P., Illston, J., (2011), “Construction Materials”, Spon Press, pp. 114-119.
- Ekwulo, E. O. and Eme, D. B., (2017), “Effect of Aggregate Gradation on Compressive Strength and Elastic Modulus of Cement Treated Aggregate Base Material for Highway

# **Experimental Investigation of Common Effectiveness of Fine Aggregate, Cement, and Compressive Strength of Optimum Mix Design of Pavement Rolled Compacted Concrete**

*Mahdi Navvabi, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.*

*Mohammad Kazem Sharbatdar, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.*

*Gholamali Shafabakhsh, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.*

*E-mail: msharbatdar@semnan.ac.ir*

Received: March 2020-Accepted: September 2020

## **ABSTRACT**

The need for a suitable Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) has effective role in the use of this concrete in the pavement. In order to achieve the desired Roller Compacted Concrete, an optimal mixing plan is required to have optimal mixing parameters such as kind of stone materials, type of aggregate, type and amount cement consumption; and other properties of its ingredients can play a significant role. In this paper, by changing the RCC's gradation in 8 different types, inside and outside the specified range of regulations, and 5 different percentages of cements, compressive strength of the cylindrical samples were tested and calculated to determine the optimal amount of cement and optimum granulation. The results of this experiment showed that the mixing plan with 34% fine grained and 66% coarse presented the best and optimal compressive strength. The concrete compressive strength of Rolled Compacted Concrete was increased by increasing the cement up to limited amount.

**Keywords:** Roller Concrete Compacted Pavement, Optimum Gradation, Cement, Compressive Strength