



## بررسی خواص مکانیکی بتن سبک گوگردی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

رضانعلی الوند<sup>۱</sup>، یاسر پروین درآباد<sup>۲</sup>، حیدر داودیان<sup>۳</sup>، سیدمهدی سیدکلبدی<sup>۴\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه غیر انتفاعی لقمان حکیم، گرگان، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد، ساری، ایران

۴- کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### خلاصه

استفاده از گوگرد به عنوان یک ماده ساختمانی به قرن ها پیش برمی گردد. در قدیم از گوگرد به عنوان چسباننده سنگ ها به یکدیگر استفاده می گردید. پس از جنگ جهانی اول به علت تولید مازاد بر مصرف صنعت تحقیقات زیادی جهت استفاده از گوگرد در صنایع گوناگون آغاز شد که باعث پیشرفت چشمگیری در مصرف گوگرد در مصالح ساختمانی شد. افزودن گوگرد مذاب به مصالح سنگی ایده ساخت بتن گوگردی را ارائه نمود. در این روش کار با اضافه کردن یک افزودنی به گوگرد، گوگرد عمل آوری شده و خاصیت مکانیکی آن بهبود می یابد، در این تحقیق به جای استفاده از مصالح سنگی متداول از مصالح سبک سنگی صنعتی لیکا استفاده می شود و خواص مکانیکی این بتن سبک گوگردی مورد بررسی قرار می گیرد می شود. در این پژوهش با استفاده از طرح اختلاط (۸۱ درصد گوگرد، ۵ درصد ماده مضاف و ۵ درصد میکروسیلیس) و لیکا پس از ۱ روز، مقاومت فشاری میانگین بالاتر از ۲۶/۹ به دست آمد که با در نظر گرفتن وزن مخصوص می توان گفت این نوع بتن با طرح اختلاط یاد شده، شرایط بتن سبک را به عنوان یک بتن سبک نیمه سازه ای دارد.

**کلمات کلیدی:** بتن گوگردی، بتن سبک، لیکا، مقاومت فشاری

### ۱. مقدمه

پیشرفت های بدست آمده در زمینه اصلاح ساختار بتن های گوگردی و تولید محصولات مختلف با خواص و دوام مطلوب باعث افزایش چشم گیر فعالیت های صنعتی در راستای تجاری نمودن محصول گردیده، به طوریکه دهه اخیر شاهد پیشرفت های وسیع و قابل توجه در زمینه ارتقاء مشخصات و توسعه کاربرد بتن های گوگردی تولیدی با خواص ویژه بوده است. دارای مشخصات معمولی بتن های گوگردی شامل مقاومت فشاری، زمان گیرش سریع خصوصاً مقاومت در برابر

\* Corresponding author:  
Email: mahdi\_kolbadi@sina.kntu.ac.ir

سایش و دوام طولانی است. این فعالیت ها در راستای بدست آوردن ترکیب بتن گوگردی قوی با دامنه کاربرد وسیع با طول عمر مناسب و با سبک سازی آن می باشد. باتوجه به خواص ویژه بتن های گوگردی بیشترین کاربرد آن در ساخت سطوح صنعتی و مکان هایی است که در تماس مستقیم با مواد خورنده اسیدی قرار دارند. در این مکان ها که دیگر مواد ساختمانی زود تخریب می شوند بتن های گوگردی از خود مقاومت و کارایی بهتری نشان می دهند (۱).

با افزایش تولید سوخت های فسیلی، تولید گوگرد نیز به عنوان محصولی فرعی در پالایشگاه ها افزایش یافت. به گونه ای که به علت قیمت پایین تولید صنعتی آن، تولید معدنی آن تقریباً به طور کلی متوقف شده است. این میزان عظیم تولید و مشکلاتی که پیرامون حمل آن وجود دارد، سبب شد تا مقادیر متنابهی از گوگرد در پالایشگاه ها انباشته شود. از یک طرف هزینه های سنگین تبدیل آن به اسید سولفوریک و از طرف دیگر خطرات ناشی از انباشت گوگرد سبب شد تا در سالیان گذشته مسئولین برای رهایی از این محصول، آن را به صورت رایگان در اختیار مشتریان قرار دهند (۲).

جدول ۱- میانگین تولید گوگرد در جهان و سهم تولید ایران در بازار جهانی (۳)

سال	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳
تولید جهان (هزار تن)	۵۱۰۴۱	۵۱۹۰۶	۵۱۳۱۰	۵۲۰۷۴	۵۲۰۲۸	۵۲۶۱۵	۵۳۴۱۶
تولید ایران (هزار تن)	-	۹۶۴	۹۹۶	۱۰۵۸	۱۳۰۴	۱۲۳۹	۱۳۰۶
سهم تولید ایران	-	%۱/۸	%۱/۸	%۱/۹	%۲	%۲/۴	%۲/۴

پیشرفت های بدست آمده در زمینه اصلاح ساختار بتن های گوگردی و تولید محصولات مختلف با خواص و دوام مطلوب باعث افزایش چشمگیر فعالیتهای صنعتی در راستای تجاری نمودن محصول گردیده، بطوریکه دهه اخیر شاهد پیشرفت های وسیع و قابل توجه در زمینه ارتقاء مشخصات و توسعه کاربرد بتن های گوگردی تولیدی با خواص ویژه بوده است (۳).

## ۲. مروری بر ادبیات پیشین

در سال ۱۹۱۸، S. J. Hayde با استفاده از کوره دوار اقدام به منبسط کردن رس و شیل کرد و بدینوسلیه سبکدانه ای مصنوعی تولید کرد که از آنها در ساخت بتن استفاده شد (۴).

در سالیان اخیر نیز استفاده بتن سبک در دال سقف ساختمان های بلند مرتبه، عرشه پل ها و دیگر موارد مشابه و همچنین کاربردهای خاص مانند عرشه و پایه دکل های استخراج نفت کاربرد فراوانی یافته است. بزرگترین بنای بتن سبکدانه، یک ساختمان اداری ۵۲ طبقه در تکراس با ارتفاع ۲۱۵ متر می باشد (۵).

## ۳. مواد و روش ها

### ۱.۳. بتن سبک

یکی از معایب مهم ساختمان های بتنی وزن زیاد ساختمان می باشد که با میزان تخریب ساختمان در اثر زلزله نسبت مستقیم دارد. اگر بتوانیم تیغه های جدا کننده و پانل ها را از بتن سبک بسازیم وزن ساختمان و در نتیجه آن تخریب ساختمان توسط زلزله مقدار زیادی کاهش می یابد. ولی کم بودن مقاومت بتن سبک عامل مهمی در محدود نمودن دامنه

کاربرد این نوع بتن و بهره‌گیری از امتیازات آن بوده است. استفاده از میکروسیلیس در ساخت بتن سبک سبب شده است که مقاومت بتن بالا رود و این محدودیت کاهش یابد (۶)

### ۲.۳. گوگرد

گوگرد ماده‌ای زرد و ترد می‌باشد که قابلیت رسانایی گرمایی و الکتریکی آن کم است.

### ۳.۳. افزودنی های اصلاح کننده گوگرد

تابحال مواد مضاف زیادی برای اصلاح تمایل گوگرد به ترد شدن و به منظور به دست آوردن خواص پلاستیک از آن پیشنهاد شده است. اگر گوگرد در بتن گوگردی به صورت خالص بدون استفاده از مواد مضاف درست شود. به مرور زمان از قدرت بتن کاسته و بتن دچار ورقه شدن می‌شود. همچنین در سیکل های متناوب ذوب و یخ‌زدن یا وقتی که بتن به صورت مغروق می‌باشد باعث از هم پاشیدگی بتن می‌گردد.

### ۴.۳. طرح اختلاط بتن گوگردی

در مورد طرح اختلاط بتن گوگردی تحقیقات بسیار محدودی تابحال صورت گرفته و اغلب استفاده از طرح اختلاط بتن با سیمان پرتلند مدنظر بوده است. راهنمای ساخت بتن گوگردی ACI-541 برای ساخت بتن گوگردی با سنگدانه‌های کوچکتر از  $9/5^{mm}$  جدولی را برای بدست آوردن شش مقاومت هدفی موردنظر برای درصد وزن گوگرد و مواد سنگی مصرفی ارائه کرده است که برای استفاده با دانه‌بندیهای متفاوت مناسب نمی‌باشد. همچنین این راهنما برای درشت‌دانه‌های با بزرگترین اندازه‌های مختلف  $9/5-25^{mm}$  حدود تقریبی درصد وزن گوگرد در مخلوط را ارائه داده که برای مواد سنگی با دانه‌بندی های متفاوت نمی‌تواند جوابگو باشد (۷).

گوگرد باید همراه با مواد مضاف موجود در بازار در ترکیب بتن استفاده شود (طبق دستورالعمل ارائه شده پلاستیزه شود). روش های اصلاح گوگرد عمر مفید فوق‌العاده‌ای را برای حالت جامد نتیجه داده‌اند. چنانچه هنگام تهیه بتن، گوگرد بیش از حد حرارت ببیند ممکن است گوگرد و ماده مضاف به واکنش خود ادامه داده و بتن نامرغوبی را تولید کنند و دستورالعملهای در ارتباط با محدوده زمانی که گوگرد اصلاح‌شده در حالت مذاب می‌تواند باقی بماند را رعایت کنند (۸).

### ۵.۳. روش های آزمون سیمان گوگردی اصلاح شده

روش‌های آزمایش سیمان گوگردی اصلاح شده عبارتند از

- ۱- گوگرد و کربن با سوختن سیمان گوگردی و با استفاده از یک تجزیه‌کننده گوگرد (یا کربن) تعیین می‌شوند.
- ۲- اندازه‌گیری وزن مخصوص گوگرد طبق استاندارد (American Society of Testing Material)  $D70$  ASTM صورت می‌گیرد. این اندازه‌گیریهای در دمای  $35^{\circ}C$  صورت می‌گیرد.
- ۳- لزجت دردمای  $135^{\circ}C$  با استفاده از یک ویسکوزومتر از نوع میله‌ای دوار که با سلولهای گرم‌شونده الکتریکی و نیز کنترل‌کننده دما تجهیز شده باشند استفاده می‌شود (۹).

### ۴. تجزیه و تحلیل نتایج

در سال های اخیر، تولید بتن گوگردی به عنوان یکی از محصولات جانبی صنایع پتروشیمی بر مصرف آن پیشی گرفته، به طوری که تولید گوگرد در پالایشگاه ها به مشکل زیست محیطی تبدیل شده است. برای رفع این مشکل لازم است کاربردهای جدیدی برای گوگرد ارائه شود. یکی از مهم ترین محصولات تولید شده گوگرد بتن از گوگردی می باشد. در این بتن به جای سیمان پرتلند، از گوگرد به همراه مواد افزودنی دیگر استفاده می شود. این بتن دارای مزایای بسیاری از نظر مقاومت در برابر اسیدها و مواد خورنده، قابلیت ذوب چند باره، مصرف مجدد، نفوذ پذیری و جذب آب بسیار کم و عدم استفاده از آب در ساخت آن می باشد. از طرف دیگر خواص کاربردی این نوع بتن با بتن سیمان پرتلند برابری می کند. مشخصات فیزیکی و ساختمانی بتن گوگردی و بتن معمولی در جدول ۱ مقایسه شده است (۱۰)

جدول ۲- مقایسه ویژگی های بتن گوگردی و بتن سیمان پرتلند (۱۱)

بتن سیمان پرتلند	بتن گوگردی	مشخصه	
-	۱۳ تا ۱۵٪	گوگرد	درصد مواد تشکیل دهنده
۷٪	-	آب	
۱۵٪	-	سیمان	
-	۹ الی ۱۱٪	Fly Ash پر کننده	
۳۰٪	۳۸ تا ۴۲٪	ماسه	
۴۵٪	۳۳ تا ۳۷٪	سنگدانه درشت	
۲۴۰۵	۲۳۲۵ الی ۲۴۰۵	چگالی ( کیلو گرم بر متر مکعب)	
۲۴ الی ۳۵	۳۵ الی ۷۰	مقاومت فشاری (مگاپاسگال)	
۳/۷	۷ الی ۱۰/۵	مقاومت خمشی (مگاپاسگال)	

### ۱.۴. مصالح مصرفی

در این تحقیق از گوگرد، ماده مضاف، مصالح سنگی سبکدانه لیکا و میکروسیلیس به عنوان فیلر برای ساخت نمونه های بتن گوگردی استفاده شده است. گوگرد مذاب به عنوان ماده چسباننده به کار می رود و در واقع همان نقش سیمان در بتن معمولی را بازی می کند. ماده مضاف برای جلوگیری از کاهش مقاومت این نوع بتن و حفظ خاصیت پلاستیک آن مورد استفاده قرار می گیرد (۱۲) در این تحقیق از SMZ به عنوان ماده مضاف استفاده شده که از جنس پلیمر هیدرو کربن اولفینی می باشد (۱۳).

نسبت مصالح سنگی به کار برده شده در بتن باید طوری انتخاب شود که دانه بندی متراکم و پیوسته ی ایجاد شود. در این تحقیق از لیکای شرکت آب منطقه ای استان گلستان استفاده شده است. نمونه ها در ابعاد ۱۰X۱۰X۱۰ سانتی متر ساخته شدند و ترکیب لیکا بکار رفته به صورت لیکا شماره ۱ (قطر دانه ها از ۵/ تا ۱ میلی متر)، لیکا شماره ۲ (قطر دانه ها از ۱ تا ۲ میلی متر) و فیلر (قطر دانه ها کمتر از ۲۰۰ میکرون) بوده است.

میکروسیلیس به عنوان یک پرکننده عمل می کند و به واسطه ذرات ریزی که دارد حد فاصل دانه های سنگی و ذرات ماده چسباننده را پر می کند و به این ترتیب باعث افزایش تراکم بتن می گردد.

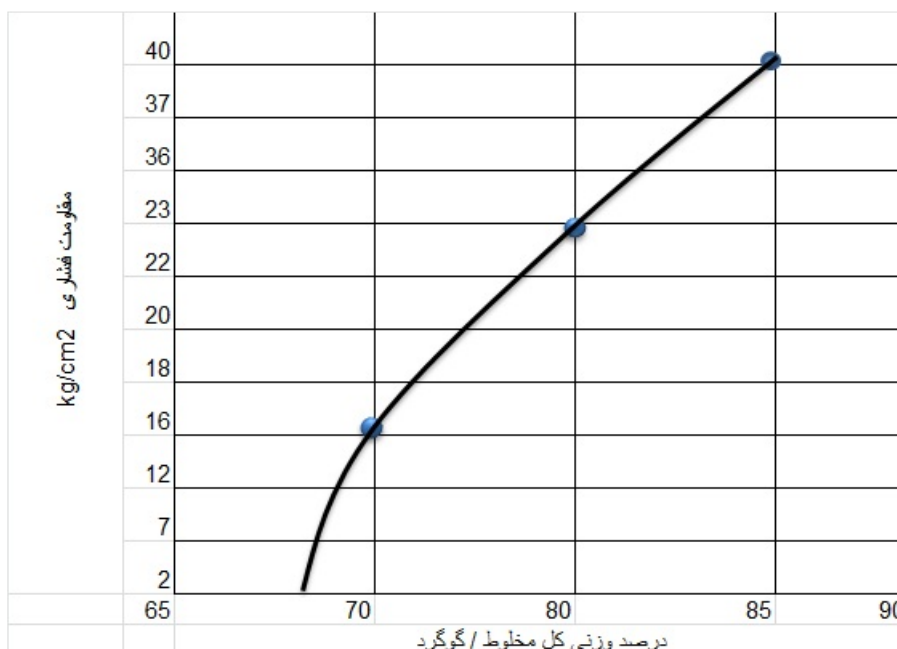
### ۲,۴. روش تهیه نمونه ها

با توجه به اینکه هدف دستیابی به طرح اختلاط بهینه برای بتن گوگردی با لیکا می باشد، بر این اساس درصدهای وزنی مناسب گوگرد، ماده مضاف و میکروسیلیس را در سه بخش محاسبه شده و در هر بخش بسته به هدف آزمایش یکی از پارامترهای فوق به عنوان متغیر و دو پارامتر دیگر به عنوان ثابت در نظر گرفته می شوند. به عنوان مثال اگر هدف آزمایش تعیین درصد بهینه گوگرد باشد، نمونه ها با ثابت نگه داشتن دو پارامتر ماده مضاف و میکروسیلیس و انتخاب درصدهای مختلف گوگرد ساخته می شوند و مورد آزمایش قرار می گیرند.

نمونه های آزمایشگاهی از ریختن مواد بتن گوگردی در دمای اختلاط ۱۳۲ تا ۱۴۱ درجه سانتی گراد در قالب فولادی تهیه می گردند. قالب ها باید قبل از بتن ریزی گرم شده باشند. مواد به وسیله کوبه و با ضربات آهسته متراکم می گردند. نمونه ها پس از ۱ ساعت ماندن در دمای محیط از قالب جدا شده و پس از مدت ۱ روز مورد آزمایش قرار می گیرند. تعداد نمونه های بررسی شده در هر نمونه سه عدد می باشد که از میانگین آن ها به عنوان نتیجه نهایی در ارزیابی نتایج استفاده می شود.

### ۳,۴. تعیین درصد گوگرد مناسب

به منظور ارزیابی تاثیر درصدهای مختلف گوگرد بر مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن گوگردی سبک سازی شده، نمونه هایی با سه درصد مختلف وزنی گوگرد (۸۵-۸۰-۷۰ درصد) و با ۵ درصد وزنی ماده مضاف SMZ (بر اساس پیشنهاد و تجربیات مخترع مواد) و به ازای هر درصد سه. آزمونه بر طبق آیین نامه بتن ایران ساخته شد. سپس آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه ها انجام شد و نتایج بدست آمده در شکل ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- تغییرات مقاومت فشاری بتن گوگردی بر حسب درصد های مختلف گوگرد

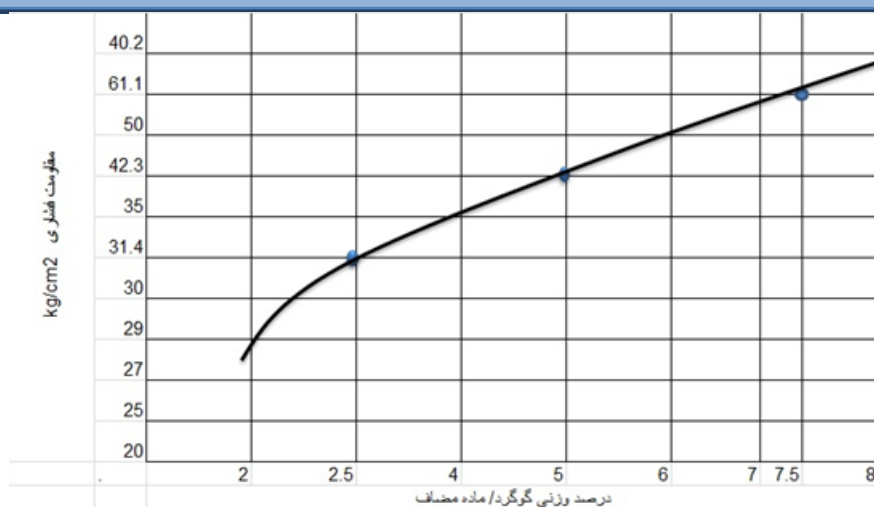
جدول ۳- اطلاعات نمونه های آزمایشگاهی، متغییر: درصد وزنی گوگرد.

ردیف	کل مخلوط/گوگرد(درصد وزنی)	گوگرد/SMZ(درصد وزنی)	گوگرد/پوزولان(درصد وزنی)	وزن نمونه (gr)	حجم نمونه (cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص نمونه (Kg/cm <sup>3</sup> )	سطح بارگذاری (cm <sup>2</sup> )	سن نمونه (روز)	مقاومت فشاری نمونه مکعبی (Kg/cm <sup>2</sup> )	مقاومت فشاری متوسط (Kg/cm <sup>2</sup> )
۱	۷۰	۵	-	۴۳۲	۱۰۰۰	۰/۶	۱۰۰	۳	۱۶	۲۶/۴
۲	۸۰	۵	-	۵۱۰	۱۰۰۰	۰/۶۴	۱۰۰	۳	۲۳	
۳	۸۵	۵	-	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱/۲	۱۰۰	۳	۴۰/۲	

از روی شکل می توان دریافت که برای این طرح اختلاط، با افزایش درصد گوگرد از ۷۵ درصد به ۸۰ درصد و ۸۵ درصد مقاومت فشاری افزایش می یابد. از آنجایی که در طرح مورد آزمایش با توجه به سبک وزن بودن دانه های لیکا، هر چه درصد گوگرد بیشتر باشد پوشش بهتری بر روی سنگدانه ها ایجاد شده و مخلوط بتن از مقاومت مطلوب تری برخوردار است، به نظر می رسد برای این طرح اختلاط درصد مطلوب گوگرد به میزان ۸۲ درصد حاصل شده است. هر چند با افزایش درصد گوگرد ( به مقدار بیش از ۸۲ درصد) افزایش بیشتری در مقاومت بتن حاصل می گردد، ولی از آنجایی که با افزایش درصد گوگرد به ماده مضاف (SMZ) بیشتری مورد نیاز است که یک ماده پر هزینه می باشد. بنابراین افزایش در کاربردهای حجم، اقتصادی و مقرون به صرفه نمی باشد.

#### ۴,۴. تعیین درصد ماده مضاف (SMZ) اول

به منظور ارزیابی تاثیر ماده مضاف، نمونه هایی با درصد گوگرد به دست آمده از مرحله قبل (۸۲ درصد) که بر اساس آن بیشترین مقاومت فشاری حاصل شده و درصدهای مختلف وزنی ماده مضاف (۲/۵ و ۵ و ۷/۵ درصد) تهیه و مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این مرحله در **Error! Reference source not found.** شکل ۲ و جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات مقاومت فشاری بتن گورگد بر حسب درصد های مختلف ماده مضاف

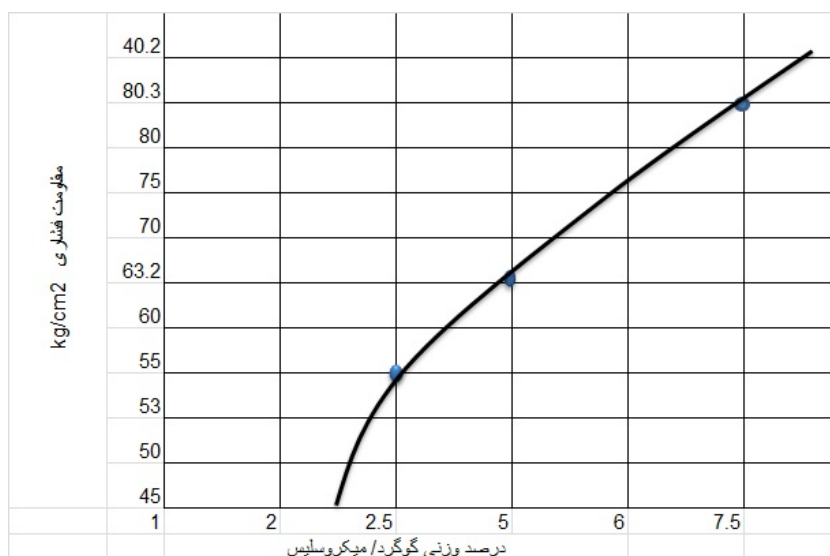
جدول ۴- اطلاعات نمونه های آزمایشگاهی، متغییر : درصد وزنی ماده مضاف

ردیف	کل مخلوط گورگد (درصد وزنی)	گورگد (درصد وزنی)	گورگد/پوزولان (درصد وزنی)	وزن نمونه (gr)	حجم نمونه (cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص نمونه (Kg/cm <sup>3</sup> )	سطح بارگذاری (cm <sup>2</sup> )	سن نمونه (روز)	مقاومت فشاری نمونه مکتبی (Kg/cm <sup>2</sup> )	مقاومت فشاری متوسط (Kg/cm <sup>2</sup> )
۱	۸۲	۷/۵	-	۱۳۹۵	۱۰۰۰	۱/۴۰	۱۰۰	۳	۶۱/۱	۴۴/۹
۲	۸۲	۵	-	۱۴۳۰	۱۰۰۰	۱/۴۳۰	۱۰۰	۳	۴۲/۳	
۳	۸۲	۲/۵	-	۱۳۸۰	۱۰۰۰	۱/۳۸۰	۱۰۰	۳	۳۱/۴	

از روی شکل می توان دریافت که برای این مصالح، با افزایش درصد ماده مضاف ۲/۵ به ۷/۵ درصد، میزان مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابد. اما با توجه به اینکه ماده مضاف بسیار پر هزینه بوده و با افزایش درصد این ماده از ۵ درصد به ۷/۵ درصد، افزایش مقاومت چندانی در مقاومت فشاری مشاهده نمی شود، به نظر می رسد مصرف درصد کمتر یعنی ۵ درصد از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه و توجیه پذیر است.

### ۵.۴. تعیین درصد میکروسیلیس مناسب

به منظور ارزیابی تاثیر میکروسیلیس، نمونه هایی با درصد های وزنی بهینه گوگرد (۸۲ درصد) و ماده مضاف (۵ درصد) به دست آمده از دو مرحله قبل و درصدهای وزنی مختلف میکروسیلیس (۲/۵ و ۵ و ۷ درصد) تهیه و مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و نتایج بدست آمده از این مرحله در جدول ۴ و شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری بتن گوگردی بر حسب درصدهای وزنی میکروسیلیس

جدول ۵- اطلاعات نمونه های آزمایشگاهی، متغییر: درصد وزنی میکروسیلیس

ردیف	کل مخلوط/گوگرد(درصد وزنی)	گوگرد smZ(درصد وزنی)	گوگرد/میکروسیلیس (درصد وزنی)	وزن نمونه (gr)	حجم نمونه (cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص نمونه (Kg/cm <sup>3</sup> )	سطح بارگذاری (cm <sup>2</sup> )	سن نمونه (روز)	مقاومت فشاری نمونه مکعبی (Kg/cm <sup>2</sup> )	مقاومت فشاری متوسط (Kg/cm <sup>2</sup> )
۱	۸۲	۵	۷/۵	۱۴۳۱	۱۰۰۰	۱/۴۳	۱۰۰	۳	۸۰/۳	۶۶/۱۶
۲	۸۲	۵	۵	۱۴۷۹	۱۰۰۰	۱/۴۸	۱۰۰	۳	۶۳/۲	
۴	۸۲	۵	۲/۵	۱۳۹۹	۱۰۰۰	۱/۴۰	۱۰۰	۳	۵۵	



شکل ۳ نشان می‌دهد که برای این نوع مصالح، با افزایش درصد میکروسیلیس از ۲/۵ درصد به ۵ درصد و به ۷ درصد مقاومت فشاری افزایش یافته است

### ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از طرح اختلاط (۸۱ درصد گوگرد، ۵ درصد ماده مضاف و ۵ درصد میکروسیلیس) و لیکا پس از ۱ روز، مقاومت فشاری میانگین بالاتر از ۲۶/۹ به دست آمد که با در نظر گرفتن وزن مخصوص می توان گفت این نوع بتن با طرح اختلاط یاد شده، شرایط بتن سبک را به عنوان یک بتن سبک نیمه سازه ای دارد. برای هر کاربردی از بتن گوگردی با توجه به مقاومت مورد نیاز و هزینه تمام شده، می توان یک درصد بهینه برای گوگرد با انجام آزمایشات تعیین نمود. در طرح اختلاط بتن گوگردی سبک سازی شده با لیکا، درصد گوگرد مناسب ۸۱ درصد وزنی کل مخلوط بتن می باشد. درصد های کمتر سبب غیر عملیاتی شدن بتن و هم چنین عدم پوشش کافی سبکدانه پرلیت که دارای مقاومت کم می باشد، گردیده که نتیجه آن کاهش مقاومت بتن خواهد بود. ماده مضاف SMZ اثر مثبتی در تثبیت خاصیت پلاستیکی گوگردی سبک سازی شده دارد. برای این منظور، درصد ماده مضاف در طرح اختلاط بهینه ساخت بتن گوگردی سبک سازی شده، ۵ درصد وزنی گوگرد پیشنهاد شده است. استفاده از میکروسیلیس به عنوان فیلر در طرح اختلاط به میزان ۵ درصد وزنی گوگرد، مقاومت فشاری این نوع بتن را طوری افزایش می دهد که می توان با توجه به وزن مخصوص آن را در محدوده بتن سبک نیمه سازه ای در نظر گرفت.

### ۶. مراجع

۱. حسین آقا بزرگ و محمد رضا ملاردی (۱۳۷۴)، "فصل هشتم - بررسی اجمالی شیمی توصیفی عناصر اصلی در شیمی معدنی (۱)"، چاپ دوم. تهران: انتشارت علوی، ۴۳۳-۴۵۰.
۲. علیزاده، غلامرضا و علی اسدی کنگرشاهی، (۱۳۸۲)، "تأثیر مصرف گوگرد و اثر باقیمانده آن در افزایش سولفات قابل استفاده خاک و رفع کمبود روی و آهن درختان سیب"، سمینار ملی تولید و مصرف گوگرد در کشور، مشهد.
3. Pronk JT, Meulenberg R, Hazeu W, Bos P, Kuenen JG (1990). "Oxidation of reduced inorganic sulphur compounds by acidophilic thiobacilli". FEMS Microbiology letters 75(2-3): 293-306 .
4. V. R. Voller, (1987), "A Fixed Grid Numerical Modeling Methodology For Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, pp-1709-1719.
5. Norok shchenov and w. whit comb, (1990), "How to obtain - strength concrete using Density Aggregate".ACI. SP 121-33, P.683.
6. zhang, Gjorv , (1991), "Mechanical properties of High - strength Lightweight concrete",

ACI materials journal 88(3), 240 –247.

7. Tebbe, Fred N.; Wasserman, E.; Peet, William G.; Vatvars, Arturs; Hayman, Alan C. (1982). "Composition of Elemental Sulfur in Solution: Equilibrium of S<sub>6</sub>, S<sub>7</sub>, and S<sub>8</sub> at Ambient temperatures". Journal of the American Chemical Society 104.

8. Steudel, Ralf; Eckert, Bodo (2003). "Solid Sulfur Allotropes Sulfur Allotropes". Topics in Current Chemistry. Topics in Current Chemistry 230

۹. مسعود حشمتی، (۱۳۸۸)، "بررسی عوامل موثر بر مقاومت و دوام بتن گوگردی رساله کارشناسی ارشد مهندسی سازه"، دانشکده مهندس عمران، دانشگاه آزاد نجف آباد.

10. Yue, Li., Caiyun, Jin. and Yunping, Xi. (2006), "The properties of sulfur rubber concrete (SRC)", J. Wuhan Uni. Technol– Mater. Sci. Ed. 129-133.

11. Anon, (1988), "Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction. Reported by ACI Committee 548", ACI Materials J. July-August, 314-325.

۱۲. محمد مهدی اکبر نژاد (۱۳۹۰)، "بتن های گوگردی و کاربرد آن"، کارگاه بتن های ویژه، شیراز.

13. McBee, W.C. and Sullivan, T.A. (1982), "Concrete formulation comprising polymeric reaction products of Sulfur/Cyclopentadiene, Oligmer/Dicyclopentadiene", Assigned to U.S. Department of Commerce. U.S. Patent No. 4, 348, 313.