

مطالعه آزمایشگاهی برخی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن گوگردی

مهدی صادقیان رنانی، عاطفه پرورش ریزی، نادر عباسی* و علی رئیسی استبرق**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، بلوار شهید فهمیده، موسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی، صندوق پستی

۳۱۵۸۵-۸۴۵، پیام‌نگار: nader_iaeri@yahoo.com

** به ترتیب فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی دانشگاه تهران؛ استادیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛ استادیار

پژوهشی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و استادیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۰/۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۸

چکیده

بتن پلیمر گوگردی، ماده‌ای ساختمانی است که از ترکیب سیمان گوگردی اصلاح شده به صورت مذاب (با استفاده از افزودنی‌های پلیمری) و مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه حاصل می‌شود. در این تحقیق تأثیر مقدار سیمان گوگردی و زمان عمل‌آوری بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن پلیمر گوگردی بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از گوگرد اصلاح شده با افزودنی پلیمر هیدروکربن اولفین و سنگدانه‌های رایج برای بتن معمولی، نمونه‌های آزمایشی با در نظر گرفتن درصد‌های مختلف مقدار سیمان گوگردی و ۴ سطح زمان عمل‌آوری در ۵ تکرار تهیه و تحت آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی قرار گرفتند. خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نقطه تسلیم و مدول یانگ و خواص فیزیکی شامل وزن واحد حجم بتن، فضای خالی مصالح در بتن و درصد هوای بتن در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که خواص مکانیکی با افزایش گوگرد تا یک حد آستانه (بسته به دانه‌بندی مصالح) افزایش و با تجاوز از آن کاهش می‌یابد. بتن پلیمر گوگردی مورد تحقیق، به طور متوسط ۷۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه‌اش را حدود ۳ روز بعد از بتن‌ریزی کسب می‌کند. مقایسه بین خواص فیزیکی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان می‌دهد که برای دستیابی به بالاترین مقاومت، دانه‌بندی متراکم، مقدار گوگرد کافی برای پر کردن فضای خالی مصالح و تراکم بتن تا حداکثر وزن واحد حجم، لازم است.

واژه‌های کلیدی

بتن گوگردی، گوگرد اصلاح شده، مصالح ساختمانی، مقاومت فشاری

مقدمه

اغلب پروژه‌های عمرانی به ویژه پوشش کانال‌های آبیاری به کار می‌رود. ولی به دلیل حساسیت این نوع بتن به معیارهای فنی و اجرایی نظیر: طرح اختلاط، روش اجرا، عمل‌آوری و ... و رعایت نشدن کامل آنها در پروژه‌های کوچک، نظیر پروژه‌های پوشش آنها، اغلب کانال‌های پوشش شده با این نوع بتن با مشکلات عدیده‌ای مثل تخریب به صور مختلف مواجه هستند. از طرفی دیگر، با توجه به برنامه‌های توسعه‌ای کشور در احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی، به ویژه شبکه‌های فرعی آبیاری، و همچنین تجهیز و نوسازی آنها سنتی و لزوم پوشش آنها

بتن به ماده ساختمانی مقاومی اطلاق می‌شود که از اتصال مجموعه سنگدانه‌های ریز و درشت با ماده چسباننده حاصل می‌شود. بتن‌ها بر حسب نوع ماده چسباننده تقسیم‌بندی می‌شوند. در بتن سیمانی معمولاً ماده چسباننده سیمان پرتلند است که در آن بین فازهای سیلیکاتی و آلومیناتی موجود در سیمان و آب واکنش شیمیایی رخ می‌دهد و منجر به تشکیل توده‌ای سخت می‌شود. بتن سیمانی به رغم هزینه زیاد تهیه و اجرای آن، یکی از متداول‌ترین مصالح ساختمانی است که در

است (Johnston, 1978). ضریب نفوذپذیری در برابر آب نمونه‌های بتن پلیمر گوگردی تحت فشار ۲/۲ مگا پاسکال خیلی پایین و حدود $10^{-13} \times 1/645$ متر بر ثانیه به دست آمده است؛ در حالی که برای بتن سیمانی این ضریب حدود $10^{-8} \times 8/39$ متر بر ثانیه است (Mohamed & El Gamal, 2009). تحقیقات نشان داده است بتن گوگردی در محیط‌های خورنده اسیدی و نمکی دوام بالاتری دارد (Sandrolini *et al.*, 2006; Mohamed & El Gamal, 2009; Okamura, 1998; Crick & Whitmore, 1998) ولی نسبت به محلول قلیایی خصوصا با pH بیشتر از ۱۰ دوام کافی ندارد (Mohamed & El Gamal, 2009; Sandrolini *et al.*, 2006; Malhotra, 1979).

بنابراین، بتن گوگردی اغلب در ساخت سازه‌هایی به کار برده می‌شود که از مواد شیمیایی آسیب می‌بینند مثل: کارگاه‌های صنعتی، سازه‌های ساحلی، کارخانه‌های صنایع غذایی و غیره. امروزه کاربرد بتن گوگردی رو به افزایش است؛ به عنوان مثال در بزرگراه‌ها، باندهای پرواز، پارکینگ هواپیماها و غیره از آن استفاده می‌شود (Li Yuo *et al.*, 2006).

به دلیل ایجاد ساختارهای کریستالی متفاوت در گوگرد، هنگام سرد شدن و تبدیل از حالت مذاب به جامد، فشار درونی بالایی در این ساختارها ایجاد و میکرو ترک‌هایی در گوگرد تشکیل می‌شود که خصوصا هنگام نوسانات دمایی بروز می‌کند و مقاومت بتن را کاهش می‌دهد (Vroom & Whitmore, 1991). به همین دلیل محققان استفاده از مواد افزودنی مختلف جهت اصلاح خواص گوگرد را بررسی کرده‌اند. مک بی و سولیوان (McBee & Sullivan, 1982) برای اصلاح گوگرد از سیکلوپنتا دی ان^۱ (CPD)، لاوترن و دیه (Leutner & Diehl, 1977) از دی سیکلوپنتا دی ان^۲ (DCPD)، گیلوت و همکاران (Gillott *et al.*, 1980). از نفت خام و افزودنی

به منظور جلوگیری از تلفات نشت، بررسی و امکان سنجی استفاده از مصالح مختلف برای اهداف یاد شده ضروری و اجتناب ناپذیر است. بتن گوگردی یکی دیگر از انواع بتن است که از اختلاط گوگرد مذاب و سنگدانه‌های ریز و درشت به دست می‌آید. در این بتن، ماده چسباننده گوگرد مذاب است و بر خلاف بتن سیمانی برای عمل آوری نیازی به آب ندارد و پس از سرد شدن، سفت و سخت می‌شود (Dale & Allen, 1967; Grugel & Toutanji, 2008). این بتن در مقایسه با بتن سیمانی دارای مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مقاومت به خستگی و طول عمر بالاتری است و به محض سرد شدن، سخت می‌شود و مقاومتش را با سرعت بالایی کسب می‌کند و برای ساخت و عمل آوری نیازی به آب ندارد (Anon, 1988). بتن گوگردی حدود ۷۰ درصد مقاومت نهایی‌اش را در کمتر از چند ساعت بعد از بتن ریزی کسب می‌کند و بعد از ۲۴ ساعت، به ۷۵ تا ۸۰ درصد مقاومت نهایی‌اش در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌رسد (Loov *et al.*, 1974). با این همه، ۱۸۰ روز طول می‌کشد که بتن گوگردی به مقاومت نهایی خود برسد که البته سرعت توسعه مقاومت به دما نیز بستگی دارد. مکانیزم کسب مقاومت در بتن گوگردی به خاطر ایجاد ساختارهای کریستالی هنگام سرد شدن و تبدیل از حالت مذاب به جامد است. به عبارتی سرعت کسب مقاومت بتن متناسب با سرعت سرد شدن و تبدیل به حالت جامد است. لذا سرعت توسعه مقاومت به دما نیز بستگی دارد.

مقاومت نهایی در دماهای بالاتر و پایین‌تر، سریع‌تر به دست می‌آید (McBee *et al.*, 1983). مقاومت نهایی در دماهای بالاتر، آهسته‌تر و در دماهای پایین‌تر، سریع‌تر به دست می‌آید (McBee *et al.*, 1983). همچنین تاکید شده است که مدارکی دال بر پس رفت و کاهش مقاومت بتن گوگردی طی شش ماه بعد از بتن ریزی مشاهده نشده

از دست نمی‌دهد (Tabatabaei, 1983). آزمایش‌ها نشان داده است که بتن گوگردی اصلاح نشده از نظر بیولوژیکی نیز نسبت به حمله باکتری تی‌اوکسیدان تیوباسیلوس اولیه^۵ به علت تولید سولفوریک اسید حساس است (Malhotra, 1979; Loov, 1974). ولی اصلاح گوگرد خصوصاً با مواد پلیمری باعث افزایش مقاومت به هواززدگی آن می‌شود. مطالعات برای اندازه‌گیری میزان هواززدگی بتن و آسفالت گوگردی اصلاح شده با DCPD، در شرایط طبیعی روزانه و فصول مختلف با اندازه‌گیری مقدار تراوش H_2S و SO_2 از سطوح بتن و آسفالت گوگردی انجام شده است. نتایج نشان داده است که این مقادیر کمتر از ماکزیمم غلظت مجاز پیشنهادی است و هواززدگی نیز ناچیز بوده است. با توجه به گزارش‌های ارائه شده در مورد ترکیب تأثیرات دما، پرتوهای فعال، بارندگی، جریان‌های سطحی و همچنین عوامل مخرب سطوح جاده‌ها مثل فرسایش ناشی از ترمز و لغزش روی سطح بتن و آسفالت گوگردی اصلاح شده، می‌توان گفت که مشکلی از نظر زیستی-محیطی ایجاد نخواهد کرد و می‌توان در محیط‌های شهری نیز این بتن را به کار برد (Deuel & Saylak, 1981). همانطور که گفته شد، بسته به شرایط اجرایی، اقتصادی، اجتماعی و غیره بتن گوگردی می‌تواند جایگزینی مناسب برای بتن معمولی در برخی پروژه‌ها در نظر گرفته شود. ماده اولیه این بتن یعنی گوگرد، به وفور در برخی کشورهای جهان و به ویژه در ایران یافت می‌شود؛ در سال ۲۰۰۸، حدود ۶۸/۸ میلیون تن گوگرد در همه شکل‌ها، در کل جهان تولید شده است. ایران که جزء ۲۵ کشور اصلی تولید گوگرد قرار دارد، در این سال حدود ۱/۵۷ میلیون تن گوگرد از محصولات فرعی معادن و نفت و گاز تولید کرده است (Ober, 2010). به رغم تحقیقات گسترده در مورد خواص مهندسی و جنبه‌های کاربردی بتن معمولی و بتن گوگردی در جهان، در خصوص بتن گوگردی و ویژگی‌های آن، تحقیقات کافی در ایران صورت نگرفته است.

در تحقیق حاضر، طرح اختلاط بتن پلیمر گوگردی و

پلی ال^۱، اشنایدر و سیمیک (Schneider & Simic, 1981) از DCPD یا الکل^۲ و وو (Woo, 1983)، از فسفریک اسید جهت بهبود مقاومت به ذوب و یخبندان، و نیمرو و کمپ بل (Nimer & Campbel, 1983) از اورگانوسیلان^۳ برای بهبود ثبات و پایداری در آب استفاده کردند. محمد و الجمال (Mohamed & El Gamal, 2009) استفاده از DCPD را عملاً غیر اقتصادی می‌دانند چون واکنش بین گوگرد و دی‌سیکلوپنتا دی‌ان گرمازاست و نیاز به کنترل زیاد گرما دارد و ضمن اینکه گوگرد اصلاح شده با DCPD در دماهای بالا ناپایدار است. بنابراین، آنها از پلی‌سولفید اولفین (Olefinic polysulfide) برای اصلاح گوگرد استفاده کردند. تثبیت کننده‌های فیزیکی مثل خاکستر بادی^۴ یا دیگر مواد ریز دانه نیز نقش مؤثری در جهت اصلاح خواص گوگرد و بتن گوگردی دارد (Vroom, 1981). علاوه بر افزودنی‌های مذکور، جنس، شکل، اندازه، و دانه بندی سنگدانه‌ها در بتن گوگردی نیز تأثیر قابل توجه بر مقاومت و دوام آن می‌گذارند (Dale & Ludwig, 1968; Crow & Bates, 1970; Abdel-Jawad & Al Qudeh, 1994; Anon, 1988). گوگرد اصلاح نشده نسبت به هواززدگی حساس‌تر است و به مرور زمان پوسته می‌کند و فرسایش می‌یابد. استفاده از گوگرد در ساخت روسازی‌های آسفالتی با جایگزین کردن ۳۰ تا ۵۰ درصد قیر مصرفی با گوگرد سبب می‌شود که سختی و مقاومت آسفالت به مقداری قابل توجه افزایش یابد و از این رو نوع آسفالت، در مناطق گرم کاربرد زیادی پیدا کند.

اضافه کردن گوگرد به قیر خالص سبب می‌شود که مخلوط حاصل در دمای بیش از ۱۱۸ درجه سلسیوس نظیر یک قیر خالص بسیار نرم را نماید ولی در شرایط بهره‌برداری با محدوده حرارتی ۳۰- تا ۶۰+ درجه سلسیوس مشخصات قیر خالص سخت داشته باشد و در نتیجه به تغییرات دمایی مقاومتر می‌شود و خواص خود را

1- Polyol
3-Organosilane
5-¹ Primarily thiobacillus thiooxidans

2- Glycol
4- Fly Ash

نخودی و ماسه (با ضریب نرمی $1/4$) به ترتیب با حداکثر اندازه ذرات برابر $12/7,25$ و $4/75$ میلی متر استفاده شد. این سنگدانه‌ها از نوع شکسته^۲ و جنس آهکی با وزن مخصوص $2/58$ گرم بر سانتی متر مکعب بودند. بر اساس کمیته ACI (Anon, 1988)، بهترین دانه بندی برای بتن گوگردی آن است که کمترین فضای خالی را ایجاد کند و در نتیجه کمترین مقدار گوگرد را نیاز داشته باشد. بر این اساس با ترکیب درصدهای مختلف این مصالح، دانه بندی‌های مختلفی تهیه شد و با استفاده از این دانه بندی‌ها و حجم گوگرد معادل حجم فضای خالی آنها، نمونه‌های بتن گوگردی ساخته و مقاومت ۲۸ روزه آنها مقایسه شد. در نتیجه، ترکیب ۶۰ درصد ماسه، ۲۰ درصد شن بادامی و ۲۰ درصد شن نخودی به عنوان بهترین دانه بندی انتخاب شد (Sadeghian et al, 2010).

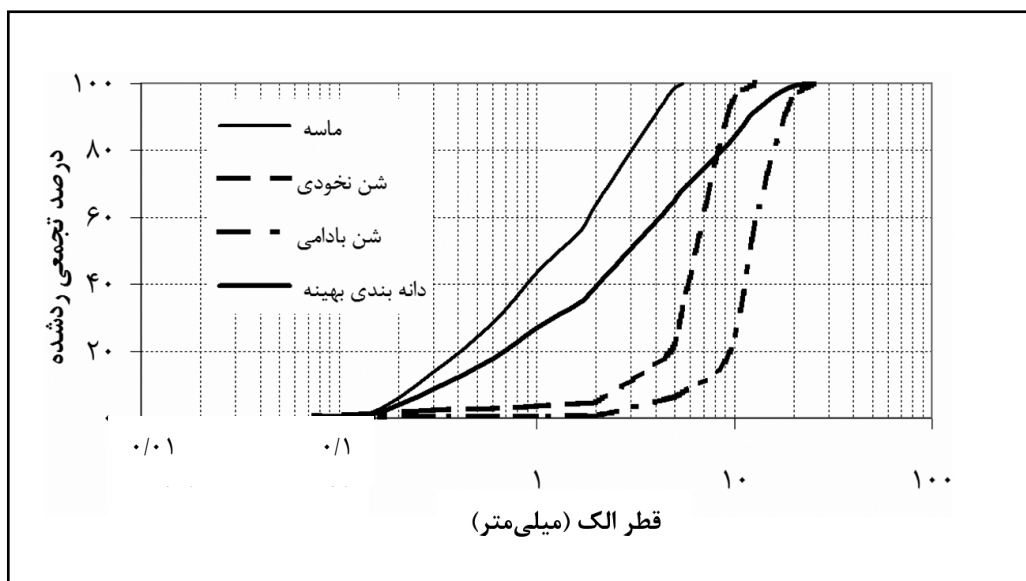
در شکل ۱ منحنی دانه بندی سه نوع سنگدانه و دانه بندی بهینه مشاهده می‌شود.

چگونگی تأثیر عوامل مختلف بر خواص مکانیکی و فیزیکی آن بررسی قرار شده است. با توجه به اینکه روی تأثیر توأمان مقدار گوگرد و سن عمل آوری بتن گوگردی تحقیقات کمتری شده است، در تحقیق حاضر تأثیر این دو عامل بر خواص مکانیکی بتن گوگردی نیز بررسی شده است. پس از تعیین خواص مکانیکی بتن پلیمر گوگردی، خواص فیزیکی آن مثل وزن واحد حجم، فضای خالی بین سنگدانه‌ها و درصد هوای بتن، برای بتن با مقادیر مختلف گوگرد اندازه گیری و رفتار مقاومتی بتن برای مقادیر مختلف سیمان گوگردی، با استفاده از این خواص فیزیکی، تجزیه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

سنگدانه‌ها

یکی از اهداف این تحقیق بررسی کاربرد بتن پلیمر گوگردی در اجراست. به این منظور از سنگدانه‌های موجود و رایج برای بتن سیمانی شامل شن بادامی، شن



شکل ۱- منحنی دانه بندی مصالح دانه ای مورد استفاده و دانه بندی بهینه

آمد. در دستگاه مذکور، گرمای مورد نیاز را یک اجاق گاز از پایین مخزن تأمین می‌کند. برای اینکه گرمای اجاق به طور یکنواخت به مخلوط هدایت شود و به طور مستقیم با گوگرد در تماس نباشد (که ممکن است خواص گوگرد را تغییر دهد) از ظرف دو جداره به عنوان مخزن استفاده و بین دو جدار با روغن حرارتی پر شد. مزیت این روش این است که دما راحت تر کنترل می‌شود و از تغییرات ناگهانی آن به هنگام کم و زیاد کردن دمای اجاق گاز، جلوگیری می‌شود. با استفاده از یک دماسنج دیجیتالی، دما در دامنه ۱۲۵ تا ۱۳۹ درجهٔ سیلسیوس با تنظیم و شعله اجاق به طور دستی ثابت نگه داشته شد. برای تهیهٔ بتن گوگردی، ابتدا سیمان پلیمر گوگردی (که قبلاً اصلاح شده است) در دمای ۱۲۰ تا ۱۳۹ درجهٔ سیلسیوس در دستگاه مخلوط کن ذوب شد. یاد آوری می‌شود که نباید دما از ۱۴۰ درجهٔ سیلسیوس تجاوز کند و گرنه ویسکوزیته گوگرد افزایش می‌یابد، از مقاومت آن کاسته می‌شود و گازهای سمی به وجود می‌آید (Anon, 1988; Saylak *et al.*, 1981). پس از اینکه گوگرد اصلاح شده کاملاً ذوب شد، سنگدانه‌های از قبل گرم شده در حین چرخش همزن، کم‌کم به آن اضافه شد. هم زدن تا آنجا ادامه یافت که نمونه کاملاً یک دست شود. قالب‌ها، کاردک، و میله متراکم کننده قبل از استفاده کاملاً گرم و داخل قالب‌ها نیز روغن کاری شدند.

مطابق ASTM C31 و با توجه به اینکه حداکثر اندازه اسمی ذرات^۱ مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر بود از قالب‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۷۵ میلی‌متر (مطابق شکل ۳)، استفاده شد. برای قالب‌گیری، قالب‌ها در سه لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه میلهٔ متراکم کننده، متراکم شدند. سطح قالب با کاردک گرم شده صاف گردید. یک الی دو ساعت

این دانه‌بندی نزدیک است به دانه‌بندی پیشنهادی موسسه بتن آمریکا (Anon, 1988) برای حداکثر اندازه اسمی ذرات برابر ۱۹ میلی‌متر، دانه‌بندی ارائه شده در مقاله کراو و بیتس (Crow & Bates, 1970)، و دانه‌بندی b تیپ IV که مؤسسهٔ آسفالت آمریکا (Anon, 2001) ارائه داده است و برای قشر رویه و آستر به کار می‌رود.

سیمان پلیمر گوگردی

سیمان گوگردی مورد استفاده در این تحقیق، از پژوهشکدهٔ توسعه صنایع شیمیایی ایران با عنوان سیمان پلیمر گوگردی^۱ یا سیمان گوگردی اصلاح شده^۲ تهیه شد. این سیمان پلیمر گوگردی از اختلاط گوگرد عنصری^۳ با افزودنی پلیمر هیدروکربن اولفین به دست آمده است. افزودنی اولفینی به گوگرد مذاب در دمای ۱۴۰ درجهٔ سیلسیوس، اضافه شده و به مدت ۱/۵ ساعت در این دما به شدت بهم زده می‌شود و سپس تخلیه و در دمای محیط جامد خواهد شد.

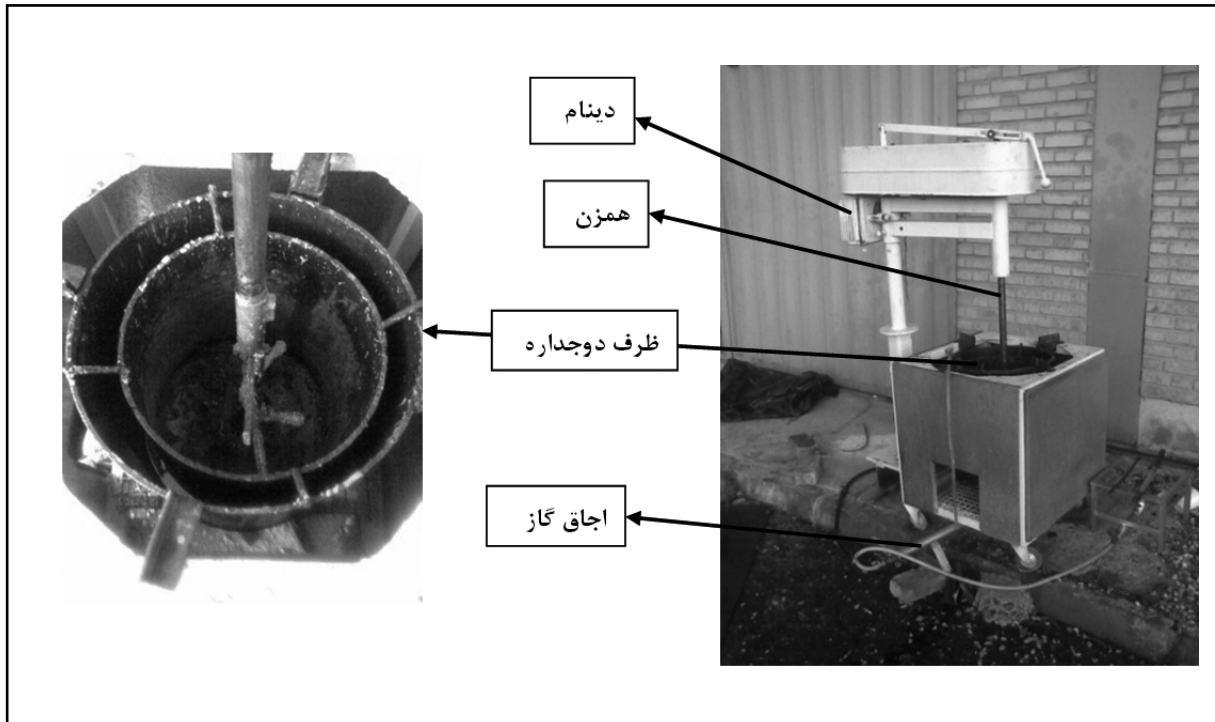
ساخت نمونه‌های بتن گوگردی

بتن پلیمر گوگردی^۴ از اختلاط گوگرد اصلاح شدهٔ مذاب و سنگدانه‌ها تهیه می‌شود که برخلاف بتن سیمانی به آب نیاز ندارد. در این پژوهش برای ذوب و مخلوط کردن گوگرد با سنگدانه‌ها، همزن ویژه‌ای طراحی و ساخته شد. شکل ۲ شمای کلی و اجزای این همزن را نشان می‌دهد. این دستگاه از سه بخش اصلی همزن، سیستم گرمایی، و مخزن تشکیل شده است. همزن نیروی خود را از یک دینام^۵ می‌گیرد که دور چرخش آن با دو تسمه^۶ و پولی^۷ به دور مناسب تبدیل می‌شود. در این دستگاه دور مناسب با سعی و خطا حدود ۱۲۰ دور بر دقیقه به دست

1- Sulfur Polymer Cement
3- Elemental Sulfur
5- Generator
7- Pulley

2- Modified Sulfur Cement (MSC)
4- Sulfur Polymer Concrete (SPC)
6- Belt
8-Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS)

بعد از قالب‌گیری، قالب‌ها باز و نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه ۲۰ درجهٔ سیلسیوس تا رسیدن به سن مورد نیاز ندارند. نظر نگهداری شدند. بتن گوگردی به عمل آوری خاصی



شکل ۲- دستگاه همزن (مخلوط کن) بتن پلیمر گوگردی و اجزای اصلی آن

انتخاب تیمارهای مورد بررسی

جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های اولیه (پیش آزمایش) صحت انتخاب این دامنه را تأیید کردند. به منظور بررسی اثر زمان عمل آوری، ۴ سطح زمان عمل آوری در نظر گرفته شد: یک روزه، سه روزه، هفت روزه، بیست و هشت روزه به ازای درصد‌های مذکور. بدین ترتیب در این پژوهش ۲۰ تیمار و هر تیمار با ۵ تکرار، و در مجموع ۱۰۰ نمونه بتن گوگردی ساخته شد.

با توجه به اینکه دانه‌بندی منتخب دارای حجم فضای خالی ۲۲ درصد، معادل ۱۷/۳۷ درصد وزنی گوگرد بود، مقادیر درصد وزنی گوگرد مصرفی (برحسب وزن کل بتن) در ۵ سطح مختلف شامل ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۰ و ۲۳ (دو مقدار کمتر و دو مقدار بیشتر از درصد مربوط به حجم منافذ) انتخاب شد. طرح اختلاط کامل بتن گوگردی در

جدول ۱- مقادیر مختلف اجزای بتن برحسب کیلوگرم بر متر مکعب در طرح اختلاط های مورد بررسی

اجزا	درصد گوگرد	۲۳ درصد	۲۰ درصد	۱۷ درصد	۱۴ درصد	۱۱ درصد
گوگرد	۵۳۵	۴۷۱	۴۰۳	۳۳۰	۲۴۸	
ماسه	۱۰۷۴	۱۱۳۰	۱۱۸۰	۱۲۱۷	۱۲۰۴	
شن بادامی	۳۵۸	۳۷۷	۳۹۳	۴۰۵	۴۰۱	
شن نخودی	۳۵۸	۳۷۷	۳۹۳	۴۰۵	۴۰۱	
وزن واحد حجم	۲۳۲۵	۲۳۵۵	۲۳۷۰	۲۳۵۸	۲۲۵۵	

آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی

هدف اصلی این تحقیق تهیه طرح اختلاط بتن پلیمر گوگردی و تعیین خواص مکانیکی (مقاومت فشاری حداکثر، نقطه تسلیم و مدول الاستیسیته) است. این خواص با استفاده از دستگاه بتن شکن دیجیتالی (شکل ۴) و مطابق با استاندارد ASTM C39 اندازه‌گیری شد. این

دستگاه مجهز به سیستم اندازه‌گیری الکترونیکی نیرو، تغییر طول و ذخیره داده‌ها (دیتالاگر) است. با انتقال این داده‌ها به کامپیوتر، با استفاده از نرم افزار Excel نمودارهای تنش- کرنش برای هر نمونه رسم و مقاومت فشاری حداکثر، نقطه تسلیم، و مدول الاستیسیته از این نمودارها استخراج شدند.



شکل ۴- دستگاه بتن شکن دیجیتال مدل WF55654



شکل ۳- قالب‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۷۵ میلی‌متر

قسمت خطی نمودار به منحنی تبدیل می‌شود نقطه تسلیم نام دارد. تا قبل از این نقطه در صورت حذف نیروی اعمال

یادآوری می‌شود که منحنی تنش - کرنش دارای دو قسمت مستقیم الخط و منحنی است. نقطه‌ای که در آن

استفاده شد و نتایج با کمک نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند. میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح آماری ۵ درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

تأثیر درصد گوگرد بر مقاومت فشاری بتن

به منظور بررسی خواص مکانیکی بتن گوگردی، منحنی تنش - کرنش هر یک از نمونه‌های آزمایشی ترسیم شد. پس از آن بر اساس منحنی‌های به دست آمده، مقادیر مقاومت فشاری حداکثر، نقطه تسلیم و مدول یانگ تعیین شدند.

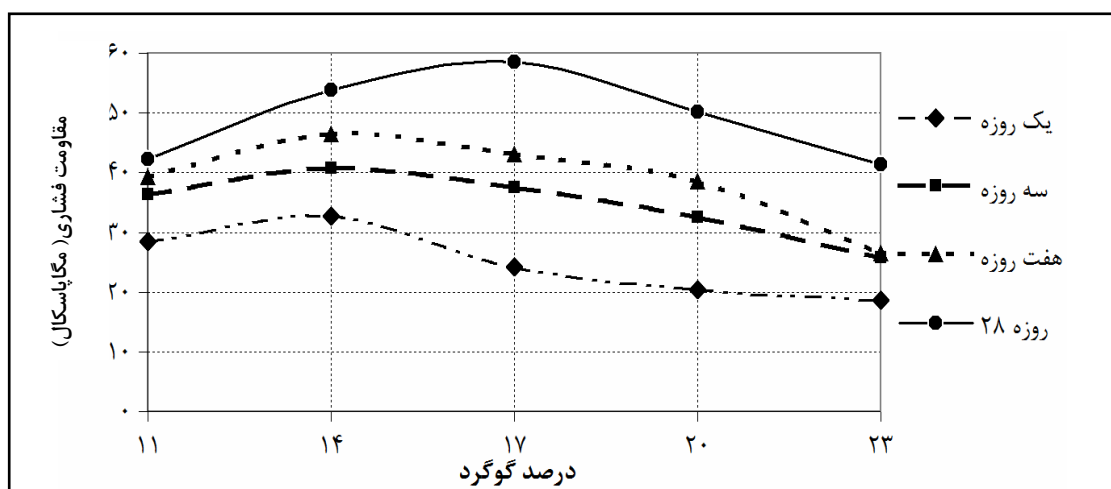
نتایج به دست آمده، همراه با تحلیل آماری آنها در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول می‌بینیم که مقاومت فشاری حداکثر در نمونه‌های ۱، ۳ و ۷ روزه به ازای ۱۴ درصد گوگرد و در نمونه‌های ۲۸ روزه به ازای ۱۷ درصد گوگرد حاصل شده است. شکل ۵ تأثیر مقدار سیمان گوگردی بر مقاومت فشاری بتن را در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری با افزایش مقدار سیمان گوگردی تا یک حد آستانه افزایش می‌یابد و تجاوز از این حد آستانه منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود.

شده بر نمونه، تغییر شکل نیز از بین می‌رود و ماده به حالت قبل از بارگذاری بر می‌گردد. ولی بعد از این نقطه، جسم حالت ارتجاعی و شکل اولیه خود را از دست می‌دهد. در صورت ادامه یافتن بار، نمونه گسیخته می‌شود. در این نقطه مقاومت فشاری نمونه به دست می‌آید.

مشخصات فیزیکی بتن شامل وزن واحد حجم، درصد فضای بین مصالح در بتن^۱ (VMA) و درصد هوای بتن مشابه آزمایش مارشال برای بتن آسفالتی و بر اساس ASTM D1559 تعیین شد. درصد هوای بتن (P_a) با استفاده از وزن مخصوص ظاهری (γ^o) و واقعی (γ) بتن طبق رابطه ۱ به دست می‌آید (Tabatabaei, 1983):

$$P_a = \frac{\gamma^o - \gamma}{\gamma} \times 100 \quad (1)$$

با مطالعه خواص فیزیکی بتن برای درصد‌های مختلف گوگرد، تفسیر رفتار مقاومتی بتن در برابر مقدار گوگرد بهتر و جامع‌تر انجام می‌گیرد. وزن مخصوص گوگرد مذاب بستگی به دمای آن دارد، ولی به طور متوسط حدود ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. در این پژوهش، جهت تحلیل نتایج خواص مکانیکی از طرح کاملاً تصادفی



شکل ۵- بررسی تأثیر مقدار سیمان گوگردی بر مقاومت فشاری بتن در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

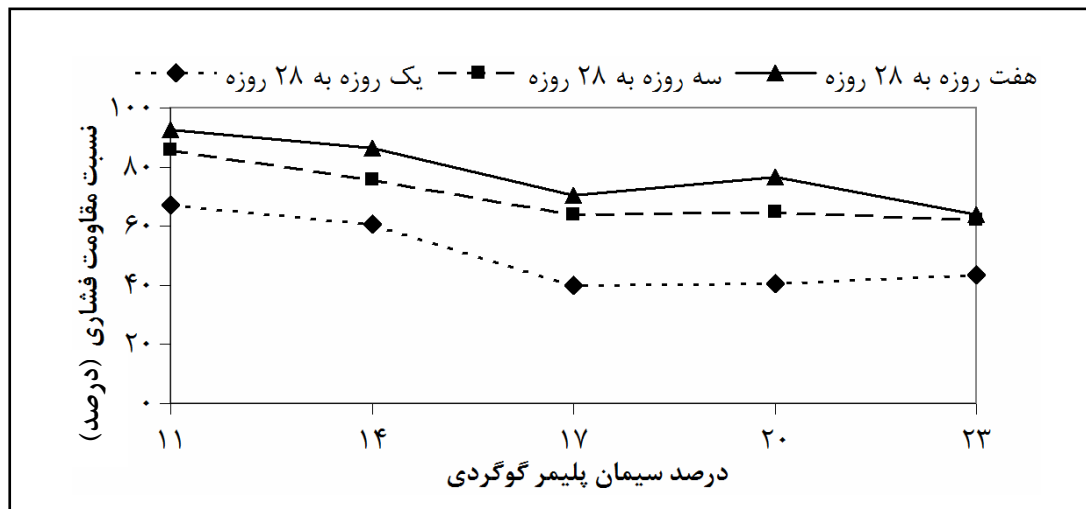
جدول ۲- مقایسه میانگین‌های مقاومت فشاری، نقطه تسلیم، و مدول یانگ برای سطوح مختلف گوگرد در سنین مختلف

درصد گوگرد					
زمان (روز)	۱۱	۱۴	۱۷	۲۰	۲۳
مقاومت فشاری حداکثر (مگاپاسکال)					
۱	۲۸/۵±۲/۶ ^{c,(w)}	۳۲/۷±۲/۰۱ ^{d,(w)}	۲۴/۲±۰/۸۸ ^{b,(w)}	۲۰/۴±۱/۳۳ ^{a,(w)}	۱۸/۷±۰/۶۲ ^{a,(w)}
۳	۳۶/۴±۰/۶۷ ^{c,(x)}	۴۰/۸±۱/۹۵ ^{d,(x)}	۳۷/۵±۱/۳۹ ^{c,(x)}	۳۲/۵±۰/۶۲ ^{b,(x)}	۲۵/۸±۰/۵۵ ^{a,(x)}
۷	۳۹/۳±۲/۰۵ ^{b,(xy)}	۴۶/۵±۲/۰۱ ^{c,(y)}	۴۱/۲±۲/۶۱ ^{b,(y)}	۳۹/۴±۱/۱۷ ^{b,(y)}	۲۶/۶±۰/۴۰ ^{a,(x)}
۲۸	۴۲/۴±۲/۸۰ ^{a,(y)}	۵۳/۹±۴/۹۳ ^{b,(z)}	۵۸/۶±۱/۷۵ ^{c,(z)}	۵۰/۲±۱/۶۱ ^{b,(z)}	۴۱/۶±۲/۵۴ ^{a,(y)}
نقطه تسلیم (مگاپاسکال)					
۱	۲۶/۱±۱/۳۱ ^{d,(w)}	۲۹/۰±۱/۱۵ ^{e,(w)}	۲۰/۸±۰/۹۶ ^{c,(w)}	۱۸/۹±۰/۸۳ ^{b,(w)}	۱۶/۴±۰/۲۲ ^{a,(w)}
۳	۳۳/۳±۰/۸۸ ^{c,(x)}	۳۶/۴±۱/۱۴ ^{d,(x)}	۳۳/۲±۱/۶۱ ^{c,(x)}	۲۷/۱±۰/۶۳ ^{b,(x)}	۲۱/۶±۰/۵۲ ^{a,(x)}
۷	۳۶/۱±۰/۷۰ ^{b,(y)}	۴۲/۶±۱/۶۳ ^{c,(y)}	۳۵/۹±۱/۴۳ ^{b,(y)}	۳۵/۴±۰/۴۸ ^{b,(y)}	۲۱/۴±۰/۴۸ ^{a,(x)}
۲۸	۴۰/۰±۳/۰۰ ^{b,(z)}	۴۹/۷±۴/۵۷ ^{d,(z)}	۵۲/۵±۲/۳۸ ^{d,(z)}	۴۴/۴±۱/۴۹ ^{c,(z)}	۳۵/۰±۱/۱۷ ^{a,(y)}
ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)					
۱	۲/۴۲۵±۰/۲ ^{c,(w)}	۲/۷۰۴±۰/۱۶ ^{d,(w)}	۱/۸۷۲±۰/۰۸ ^{b,(w)}	۱/۳۱۹±۰/۱۷ ^{a,(w)}	۱/۳۹۵±۰/۱ ^{a,(w)}
۳	۳/۹۲۸±۰/۱۳ ^{d,(x)}	۴/۳۳۴±۰/۲۳ ^{e,(x)}	۳/۴۷۷±۰/۲۹ ^{c,(x)}	۲/۷۸۰±۰/۱۹ ^{b,(x)}	۲/۱۵۳±۰/۱۴ ^{a,(x)}
۷	۴/۰۱۳±۰/۳۷ ^{c,(x)}	۴/۵۴۶±۰/۳۳ ^{d,(x)}	۳/۵۰۹±۰/۲۶ ^{b,(x)}	۳/۴۵۶±۰/۲۱ ^{b,(y)}	۲/۲۲۸±۰/۰۹ ^{a,(x)}
۲۸	۴/۲۵۷±۰/۲۳ ^{b,(x)}	۵/۰۱۴±۰/۱۱ ^{c,(y)}	۵/۳۰۰±۰/۱۳ ^{d,(y)}	۴/۲۵۲±۰/۱۵ ^{b,(z)}	۳/۳۹۸±۰/۱۰ ^{a,(y)}

^{a),(*)} مقادیر با حروف غیر مشترک در ردیف‌ها (a-e) و ستون‌ها (w-z) در سطح آماری ۵ درصد اختلاف معنی داری با یکدیگر دارند (P<0.05).

۱ روزه به ۲۸ روزه، ۳ روزه به ۲۸ روزه و ۷ روزه به ۲۸ روزه برای نمونه‌ها با درصد‌های مختلف سیمان گوگردی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای نمونه‌ها با مقادیر کمتر گوگرد، رشد مقاومت بیشتر است و با افزایش گوگرد، نمونه‌ها به زمان بیشتری برای رسیدن به مقاومت نهایی خود نیاز دارند.

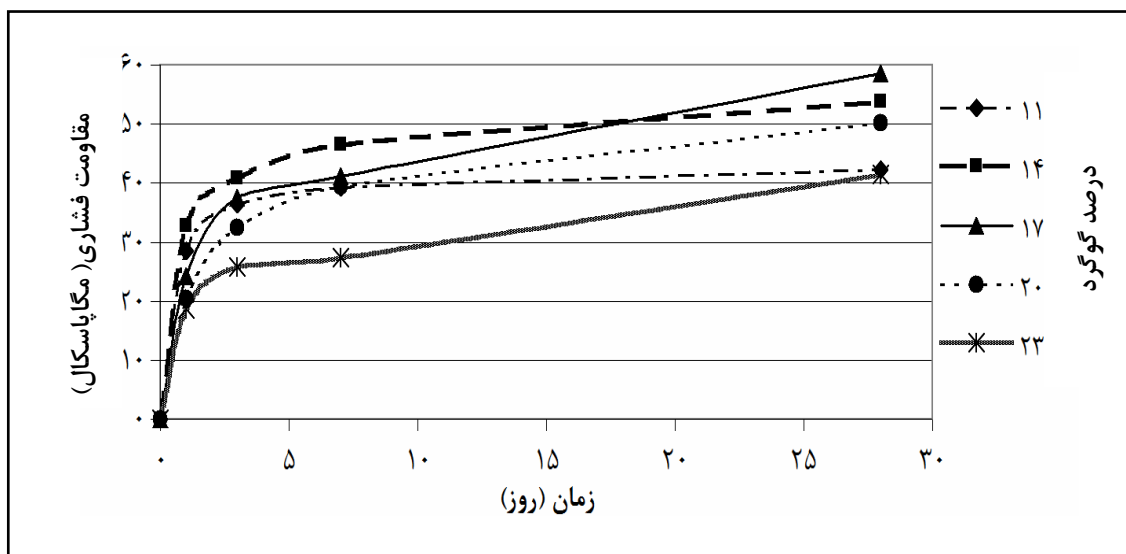
حال اگر به مقایسه میانگین‌های مقاومت فشاری بین درصد‌های مختلف سیمان گوگردی در زمان‌های مختلف (جدول ۲، مقایسه بین ستون‌های هر ردیف با حروف a,b,c,d) توجه شود، می‌بینیم که با کاهش مقدار سیمان گوگردی در بتن، سرعت رشد مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. برای وضوح بیشتر در شکل ۶ نسبت مقاومت فشاری



شکل ۶- نسبت مقاومت فشاری بتن در سنین یک، سه، و هفت روزه به مقاومت ۲۸ روزه (بررسی روند رشد مقاومت با زمان) برای بتن با درصدهای مختلف سیمان گوگردی.

می‌شود که در روزهای اول بعد از بتن ریزی مقاومت با سرعت زیادی افزایش می‌یابد و به طور متوسط حدود ۷۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه در همان ۳ روز اول کسب شده است. بعضی محققان نشان دادند که بتن گوگردی یک روزه بعد از ساخت، بیش از ۷۰ درصد مقاومت نهایی خود را به دست می‌آورد (Loov *et al.*, 1974). ولی این سرعت توسعه مقاومت به عوامل دیگری مثل دما و نوع افزودنی نیز بستگی دارد. مقاومت نهایی در دماهای بالاتر آهسته‌تر و در دماهای پایین‌تر سریع‌تر به دست می‌آید (McBee *et al.*, 1983). نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مواد افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، نسبت به مواد افزودنی استفاده شده در مقاله مذکور (Loov *et al.*, 1974) سرعت رشد کمتری در بتن ایجاد کرده است.

بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن
 برای بررسی تأثیر زمان بر مقاومت فشاری در درصدهای مختلف سیمان گوگردی، این بار میانگین‌های مقاومت فشاری برای هر درصد در زمان‌های مختلف به روش دانکن به کمک نرم افزار SPSS مقایسه شدند (جدول ۲، مقایسه بین ردیف‌های هر ستون، با حروف (w,x,y,z). در این جدول مشاهده می‌شود که اختلاف معنی‌داری بین زمان‌ها در اکثر درصدها، وجود دارد. این امر اهمیت نسبی زمان را در کسب مقاومت این نوع بتن نشان می‌دهد. اما در شکل ۷ می‌بینیم، که شیب نمودار با افزایش درصد گوگرد زیادتر و با کاهش درصد گوگرد کمتر می‌شود. این شکل نیز موید نتایج توضیح داده شده در قسمت قبلی است. از طرف دیگر، در شکل ۷ مشاهده

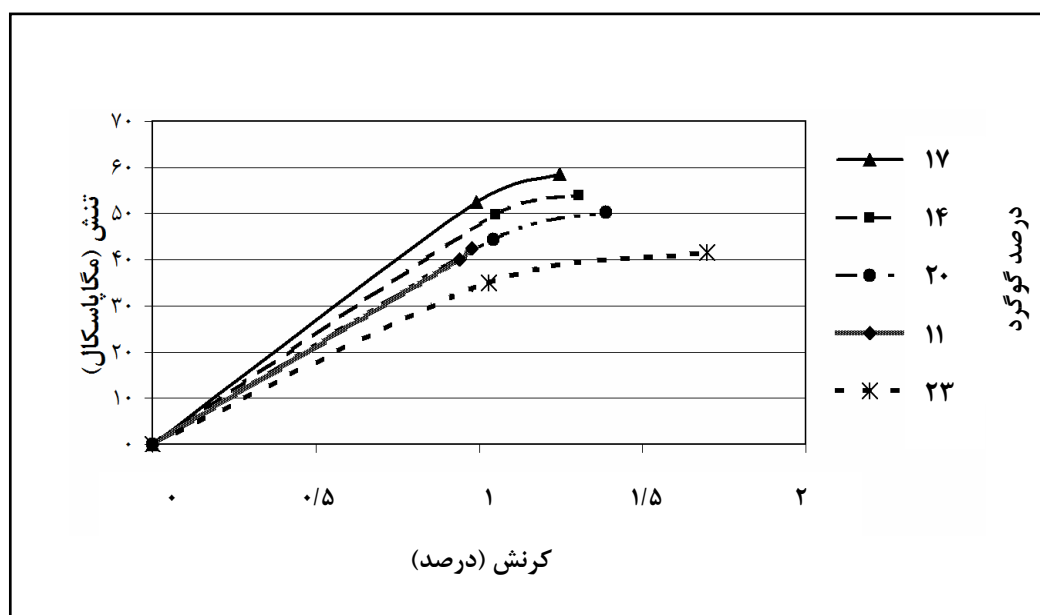


شکل ۷- بررسی تأثیر زمان بر مقاومت فشاری بتن گوگردی در درصد‌های مختلف گوگرد

نمونه‌های با ۱۴ درصد گوگرد حداکثر مقدار است ولی در نمونه‌های ۲۸ روزه حداکثر مقادیر در نمونه‌های حاوی ۱۷ سیمان گوگردی حاصل شده است. در شکل ۸ رابطه مستقیم بین مقاومت فشاری حداکثر، نقطه تسلیم (نقطه‌ای که، قسمت خطی نمودار به منحنی تبدیل می‌شود)، و مدول یانگ (ضریب زاویه قسمت خطی منحنی) در منحنی‌های فوق نشان داده شده است. با افزایش مقاومت فشاری حداکثر، نقطه تسلیم و مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابند.

تأثیر درصد گوگرد و زمان عمل آوری بر خواص الاستیسیته بتن گوگردی

تأثیر مقدار گوگرد و زمان عمل آوری بر خواص الاستیسیته با توجه به نتایج جدول ۲ و منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌ها در شکل ۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، روندهای شرح داده شده برای مقاومت فشاری در مورد نقطه تسلیم و مدول یانگ نیز صدق می‌کند. برای مثال، مقاومت نمونه‌ها در نقطه تسلیم و مدول یانگ در زمان ۱، ۳، و ۷ روزه برای



شکل ۸- منحنی‌های تنش- کرنش میانگین بین تکرارها برای درصدهای مختلف بتن گوگردی ۲۸ روزه

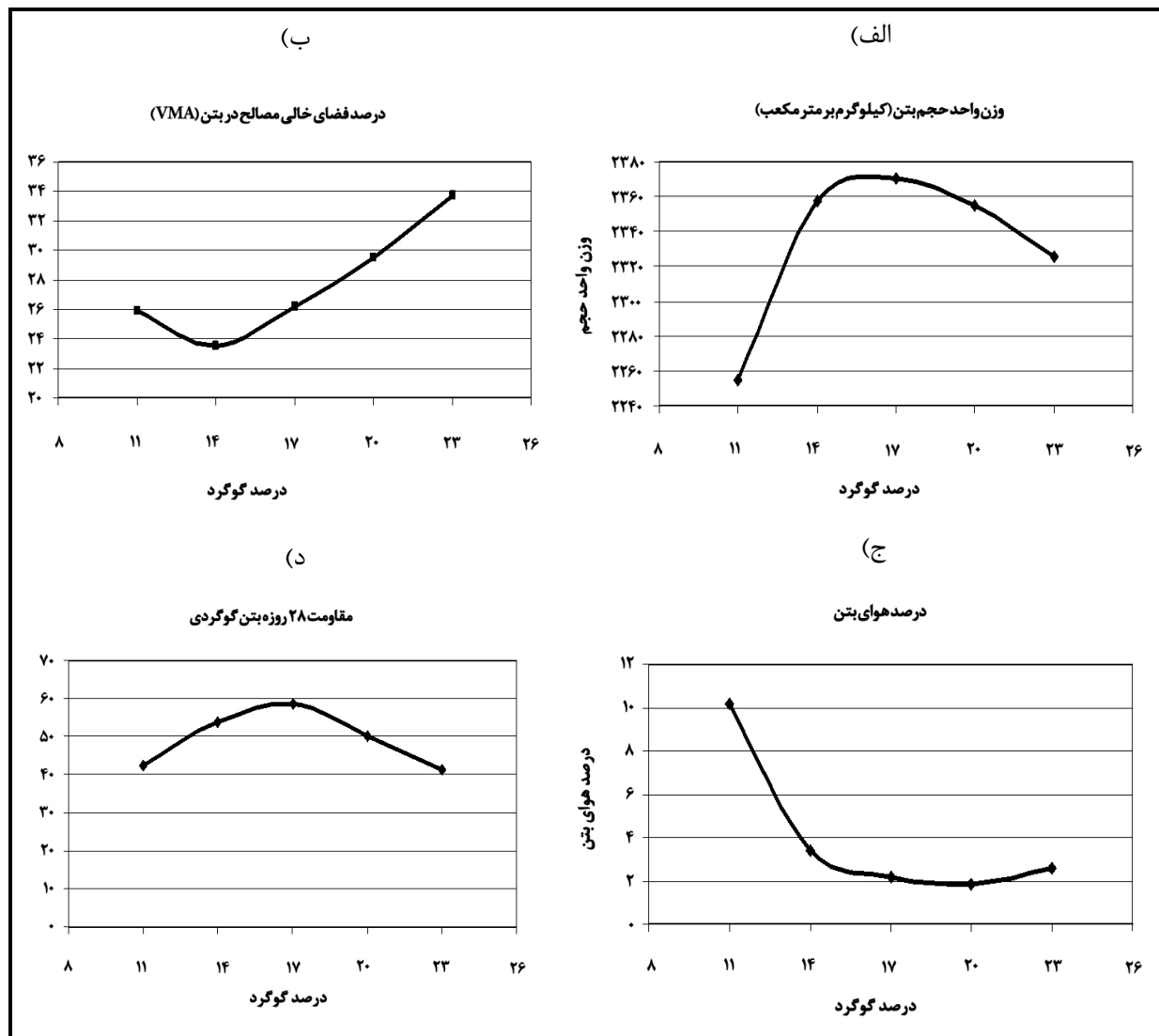
مشاهده خواهد شد که کرنش در نقطه شکست و همچنین فاصله افقی (کرنش) بین نقاط تسلیم و مقاومت فشاری حداکثر، با افزایش درصد گوگرد افزایش یافته است. با توجه به اینکه میزان تغییر شکل ماده در مرحله گسیختگی یا شکست معیاری است برای تعیین میزان نرمی^۱ بتن (Rahimi, 2006; Li Yue et al., 2006)، از این رو این پدیده نشان می‌دهد که میزان نرمی بتن با افزایش درصد گوگرد افزایش یافته است.

تأثیر مقدار گوگرد بر خواص فیزیکی بتن پلیمر گوگردی

نتایج این بخش از آزمایش‌ها به صورت نمودارها در شکل ۹ نشان داده شده است. برای سهولت مقایسه، نمودار تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نیز رسم شده است.

در شکل ۸، قسمتی که منحنی به صورت خط مستقیم است و در واقع کرنش متناسب با تنش اعمال شده است، رفتار ماده حالت ارتجاعی دارد و این بخش از تغییر شکل ماهیت الاستیک دارد. در این محدوده تغییر شکل، چنانچه نیروی اعمال شده به ماده حذف شود، تغییر شکل نیز به طور کامل از دست می‌رود و ماده به حالت قبل از بارگذاری بر می‌گردد (Rahimi, 2006; Hibbeler, 1992).

مقاومت بالای بتن گوگردی و درعین حال کوچکی مدول الاستیسیته و نزدیکی نقطه تسلیم به مقاومت حداکثر، در مقایسه با بتن معمولی، نشان می‌دهد که بتن گوگردی خاصیت ارتجاعی بالاتری نسبت به بتن سیمانی دارد. بنابراین، بتن گوگردی، خاصیت ارتجاعی خود تحت بار بیشتری حفظ می‌کند و در حالت الاستیک باقی می‌ماند. اگر با دقت به منحنی‌های فوق توجه شود



شکل ۹- الف) نمودار وزن واحد حجم بتن در برابر درصد های مختلف گوگرد ب) درصد فضای خالی مصالح در بتن VMA ج) درصد هوای بتن و د) مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن گوگردی در برابر درصد های مختلف گوگرد

از آن به بعد کاهش می‌یابد. همین روند نیز برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه تکرار شده است. با افزایش گوگرد تا ۱۷ درصد مقاومت افزایش و از آن به بعد کاهش داشته است. بنابراین رابطه مستقیم بین وزن واحد حجم و مقاومت فشاری بتن گوگردی کاملاً مشهود است. عامل تأثیرگذار دیگر در مقاومت بتن، درصد فضای خالی مصالح در بتن یا VMA می‌باشد. با افزایش گوگرد از ۱۱ درصد به ۱۴ درصد، فضای خالی مصالح کاهش یافته است. دلیل این

در این تحقیق در ساخت نمونه‌ها سعی شده است که میزان تراکم و دانه‌بندی سنگدانه‌ها ثابت بماند تا تنها عامل اصلی مؤثر در خواص مکانیکی و فیزیکی بتن، درصد گوگرد باشد. در شکل ۹ ب) VMA درصد فضای بین مصالح در بتن است که این فضا با گوگرد و هوا پر شده است. این پارامتر به نوعی بیانگر فاصله بین سنگدانه‌ها در بتن است. در شکل ۹- الف مشاهده می‌شود که با افزایش میزان گوگرد تا ۱۷ درصد، وزن واحد حجم بتن افزایش و

یافته است، چون مخلوط در این درصد گوگرد، شل و آبکی است و ضربات میلی متراکم کننده چندان کارساز نیست و علاوه بر این حباب‌های بیشتری از هوا وارد مخلوط شده است.

نتیجه‌گیری

بر اساس مجموعه بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، موارد زیر قابل استنتاج هستند:

۱- افزایش مقدار سیمان گوگردی در بتن گوگردی تا یک حد آستانه سبب افزایش مقاومت ولی تجاوز از این حد آستانه منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. برای شرایط تحقیق حاضر، حد آستانه برابر ۱۷ درصد وزنی گوگرد و معادل مقدار گوگرد لازم برای پر کردن فضای خالی مصالح به دست آمد.

۲- رشد مقاومت فشاری نسبت به زمان در بتن پلیمر گوگردی همانند بتن سیمانی معمولی روندی صعودی دارد ولی در این بتن، بر خلاف بتن سیمانی، حدود ۷۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه در ۳ روز اول بتن‌ریزی کسب شده است.

۳- رشد کسب مقاومت با افزایش درصد گوگرد کندتر و با کاهش درصد گوگرد تندتر است.

۴- روند تغییرات نقطه تسلیم و مدول الاستیسیته برای مقادیر مختلف گوگرد و زمان‌های مختلف عمل‌آوری تقریباً مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد گوگرد میزان نرمی و خاصیت ارتجاعی بتن افزایش می‌یابد.

۵- مقایسه خواص فیزیکی و مقاومتی نمونه‌ها برای مقادیر مختلف گوگرد نشان می‌دهد که بالاترین مقاومت فشاری وقتی به دست می‌آید که میزان گوگرد در بتن به مقداری باشد که به دوری بیش از حد سنگدانه‌ها از یکدیگر نینجامد و وزن واحد حجم بتن به بیشترین مقدار خود برسد. این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که مقدار گوگرد در بتن معادل فضای خالی مصالح آن باشد.

موضوع می‌تواند افزایش لغزندگی بین ذرات باشد که باعث شده است تا ذرات به هم نزدیک‌تر شوند و تراکم بهتر انجام گردد. با افزایش گوگرد از ۱۴ درصد به بالا، حجم گوگرد بیش از میزان فضای خالی اولیه مصالح شده و بین ذرات فاصله بیشتری ایجاد خواهد شد که این امر موجب افزایش VMA شده است. که در مقاومت فشاری بتن گوگردی نیز مؤثر خواهد بود. سیمان گوگردی به مقدار ۱۴ درصد و کمتر اگرچه توانسته تراکم بیشتری در بتن به وجود آورد ولی مقدار گوگرد چندان نبوده است تا بتواند سنگدانه‌ها را به خوبی به هم بچسباند و بنابراین، از مقاومت بتن کاسته شده است. از طرف دیگر، گوگرد بیش تر از ۱۷ درصد نیز موجب افزایش فاصله بین ذرات شده و از وزن واحد حجم بتن کاسته است. در واقع، افزایش گوگرد بیش از ۱۷ درصد، اسکلت‌بندی و درگیری بین ذرات را کاهش داده و در نتیجه مقاومت بتن را پایین آورده است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر، باید بین وزن واحد حجم و فضای خالی مصالح در بتن تعادل برقرار باشد. موسسه بتن آمریکا (Anon, 1988)، نیز این روند تغییرات در وزن واحد حجم، درصد هوای بتن، و مقاومت فشاری برای درصد‌های مختلف گوگرد را مشاهده کرده است. همانطور که در شکل ۹- ج مشاهده می‌شود با افزایش درصد گوگرد، هوای بتن نیز کاهش می‌یابد. در واقع درصد هوای بتن و VMA با هم در ارتباط هستند. در فاصله ۱۱ درصد تا ۱۴ درصد که هوای بتن زیاد است، با افزایش گوگرد از ۱۱ درصد به ۱۴ درصد، گوگرد جای هوا را می‌گیرد و بنابراین عامل دیگر کاهش VMA، قرار گیری گوگرد به جای هواست. ولی از ۱۴ درصد به بعد چون هوای بتن کاهش یافته است، افزایش گوگرد فضایی برای اشغال شدن توسط هوای بتن باقی نمی‌گذارد و لذا این امر موجب افزایش فاصله بین ذرات یا VMA می‌شود. در ۲۳ درصد گوگرد مشاهده می‌شود که هوای بتن کمی افزایش

مراجع

- Anon, 1988. Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction. Reported by ACI Committee 548. ACI Materials J. July-August, 314-325.
- Anon. 2001. Superpave mix design. Superpave Series No. 2 (SP-02). Asphalt Institute. Lexington, Ky.
- Abdel Jawad, Y. and Al Qudeh, M. 1994. The combined effect of water and temperature on the strength of sulfur concrete. J. Cement and Concrete Research. 24, 165-175.
- Crick, S.M. and Whitmore, D.W. 1998. Using sulfur concrete on a commercial scale. International Concrete Research & Information Portal. American Concrete Institute. Detroit. Michigan. 20(2): 83-86.
- Crow, L.J. and Bates, R.C. 1970. Strength of sulfur-basalt concrete. Report No. RI 7349. U.S. Bureau of Mines. Washington. D.C.
- Dale, J.M. and Allen, A.C. 1967. Sulfur- aggregate concrete. Civil Eng. ASCE. 66-68.
- Dale, J.M. and Ludwig, A.C. 1968. Advanced studies of the sulfur aggregate mixture as a structural material. Technical Report NO. AFWL-TR-68-21. Southwest Res. Inst. San Antonio.
- Deuel, L.E. and Saylak, D. 1981. Environmental and safety aspects of the use of sulfur in highway pavements: Part II – Weathering and In-Service Considerations. Proceedings of SULPHUR-81 an International Conference on Sulfur. Calgary. May. 681-709.
- Gillott, J.E., Jordan, I.J., Loov, R.E. and Shrive, N.G. 1980. Sulfur concretes, mortars and the like. U.S. Patent No. 4, 188, 230.
- Grugel, R.N. and Toutanji, H. 2008. Sulfur "concrete" for lunar applications- sublimation concerns. , Adv. Space. Res. 41, 103-112.
- Hibbeler, R.C. 1992. Engineering Mechanics: Statics and Dynamics. 6th Ed. Macmillan Pub Co. New York. USA.
- Johnston, C.D. 1978. Preparation, proportioning and properties of sulfur concrete. Proceeding of the International Conference on Sulfur in Construction, Canmet, Energy, Mines, and Resource. Canada, Sep. 12-15. Ottawa. 413-432.
- Leutner, B. and Diehl, L. 1977. Manufacture of sulfur concrete. U.S. Patent No. 4, 025,352.
- Loov, R.E. 1974. Sulfur concrete – state of the art in 1974. Research Report No. CE75-2. Dep. Civil Eng. Uni. Calgary.
- Loov, R.E., Vroom, A.H. and Ward, M.A. 1974. Sulfur concrete a new construction materials. J. Prestressed Concr. Inst. 19 (1): 86-95.
- Malhotra, V.M. 1979. Sulfur concrete and sulfur infiltrated concrete: Properties, Application and Limitations. CANMET Report 79-28. Energy, Mines and Resource. Canada. Ottawa.

- 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.
- McBee, W.C. and Sullivan, T.A. 1982. Modified sulfur cement. Assigned to U.S. Department of Commerce. U.S. Patent No. 4, 311, 826.
- McBee, W.C., Sullivan, T.A. and Jong, B.W. 1983. Corrosion – Resistant sulfur concrete. BuMines Report No. 8758. U.S. Bureau of Mines. Washington. D.C.
- McBee, W.C., Sullivan, T.A. and Jong, B.W. 1983. Industrial evaluation of sulfur concrete in corrosive environments. BuMines Report No. RI 8786. U.S. Bureau of Mines. Washington. D.C.
- Mohamed, A.M.O. and EL Gamal, M. 2009. "Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete". Department of Civil and Environmental Engineering. UAE University. United Arab Emirates. Cement & Concrete Composites. 31,186-194.
- Nimer, F.L. and Campbell, R.W. 1983. Sulfur cement-aggregate-organosilane composition and methods for Preparing. U.S. Patent No. 4, 376, 830.
- Ober, J.A. 2010. Sulfur. In: 2008 Minerals Yearbook.74.1-74.17. Revised Jan. 20. 2011. <http://www.usgs.gov>. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook.
- Okamura, H.A. 1998. Early sulfur concrete installations. Concrete International. American Concrete Institute. 72-75.
- Rahimi, H. 2006. Construction Materials. Uni. Tehran Press. (in Farsi)
- Sadeghian, R.M., Paravesh, A. and Abbasi, N. 2010. 'Application of Sulfur Concrete for Lining of Irrigation Canals', 2nd national Conference on Geotechnical Issues of Irrigation and Drainage Networks. May. 13. Karaj. Iran
- Sandrolini, F., Manizi, S. and Andrucci, A. 2006. Sulfur- polymer matrix composites from particulate wastes: A sustainable route to advanced materials. Inter. J. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 37, 695-702.
- Saylak, D., Deuel, L.E. and Zahray, R. 1981. Environmental and safety aspect of the use of sulfur in highway pavements: Part I-Mix Preparation and Construction. Proceedings of: SULFUR-81 and International Conference on Sulfur. Calgary. May. 651-679.
- Schneider, R.A. and Simic, M. 1981. Plasticized sulfur composition. U.S. Patent No. 4, 308, 072.
- Tabatabaei, A. 1983. Road Pavement. University Press Center.
- Vroom, A.H. 1981. U.S. Patent No. 4, 293, 463.

مطالعه آزمایشگاهی برخی خواص فیزیکی و...

- Vroom, A.H. and Whitmore, D.W. 1991. Sulfur concrete for high corrosion resistance. In: Proceeding. National Association of Corrosion Engineers. Saskatoon. Canada.
- Woo, G.L. 1983. Phosphoric acid treated sulfur cement-aggregate compositions. U.S. Patent No, 4, 376, 831.
- Yue, Li., Caiyun, Jin. and Yunping, Xi. 2006. The properties of sulfur rubber concrete (SRC). J. Wuhan Uni. Technol- Mater. Sci. Ed. 129-133.



Mechanical and Physical Properties of Sulfur Polymer Concrete

A. Sadeghian, A. Parvaresh, N. Abbasi* and A. Raeisi

* Corresponding Author: : Assistanant professor, Iranian Agricultural Engineering Research Institute, IAERI, Karaj, Iran, P. O. Box: 31585-845, Fax: +982632706277. E-Mail: nader_iaeri@yahoo.com
Received: 3 April 2011, Accepted: 28 January 2011

Sulfur polymer concrete (SPC) is a construction material composed of melted modified sulfur cement (MSC) and fine and coarse aggregates. This research investigated the effects of the quantity of MSC and curing time on the mechanical and physical properties of SPC. Samples were prepared using five levels of MSC and four curing times. The MSC used contained olefin hydrocarbon polymeric additive and the aggregates were those commonly used for conventional concrete. The mechanical and physical properties of the samples (compressive strength, yield point and Young's modulus, unit weight, voids in the aggregate and concrete air content) were determined. The results showed that increasing in the amount of MSC up to a specific threshold value (depending on aggregate gradation) improved the mechanical properties of samples. Beyond the threshold point, a decreasing trend was observed. The SPC in the present study gained an average of 70% of its 28-day compressive strength by three days from concrete placement. The greatest 28-day compressive strength was achieved using the densest aggregate gradation, a sufficient amount of MSC to fill voids in the aggregate and the maximum unit weight of SPC.

Keyword: Sulfur polymer concrete, Modified sulfur cement, Compressive strength