مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز ۱۴۰۰، جلد چهاردهم، شماره ۳، صفحه ۳۳ تا ۴۵

بررسی تاثیر کمک خردایش‌های مختلف بر روی کیفیت سیمان و راندمان خردایش سیمان تولیدی؛ مطالعهٔ موردی کارخانه سیمان ارومیه

حجت حسین زاده قره قشلاق * [۱]، سجاد چهره قانی [۲]، عارف علیپور [۳]، سینا سلطانعلی نژاد [۴]

دریافت مقاله: ۹۹/۰۵/۱۰ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۲۸

چکیده

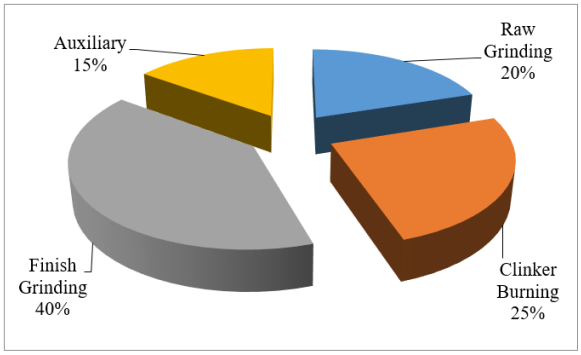
در این تحقیق اثر چهار نوع کمک خردایش (TIPA، TEA، HA و NC) در سه سطح مختلف بر روی ویژگی‌های بسیار مهم سیمان یعنی مساحت سطحی ویژه (عدد بلین)، مقاومت فشاری بتن و راندمان خردایش (صرفه‌جویی انرژی) در فرآیند خردایش کلینکر کارخانه سیمان ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحلهٔ اول، با انجام آزمایش خردایش سنتیکی، زمان آسیای مورد نیاز برای رسیدن به عدد بلین مورد نظر کارخانه (۳۶۳۶ سانتی مترمربع بر گرم) برابر ۷۸/۲۴ دقیقه بدست آمد. سپس، ۱۳ تست خردایش در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از ترکیب سیمان کارخانهٔ ارومیه و چهار نوع کمک خردایش در ۳ سطح مختلف ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب تری ایزوپروپانول با سطح ۰/۰۸ درصد (TIPA-0.08) با عدد بلین ۴۰۳۲ سانتی مترمربع بر گرم و راندمان خردایش ۱۰/۸۹ درصد دارای بیشترین تاثیر در ریزی و راندمان خردایش است. همچنین، برروی نمونه‌های بتن تهیه شده از تمامی ترکیب‌ها آزمایش های مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین افزایش مقاومت برای تمامی سنین متعلق به ترکیب TIPA-0.08 بوده است که مقدار افزایش برای مقاومت‌های فشاری ۲، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۳۶/۹۲، ۳۱/۲۳ و ۲۱/۸۵ درصد نسبت به حالت مرجع (بدون کمک خردایش) شده است. از طرفی، نتایج حاصل از آزمایش‌های خردایش و مقاومت فشاری بتن، نشان دهندهٔ یک توافق نسبی بین راندمان خردایش – مقاومت فشاری بتن هستند.

کلید واژه‌ها: *سیمان، بتن، عدد بلین، مقاومت فشاری، کمک خردایش، انرژی خردایش.*

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکدهٔ محیط زیست، دانشگاه صنعتی ارومیه (h.hoseynzade@uut.ac.ir &h.hoseynzade@yahoo.com)
۲. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.
۳. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکدهٔ محیط زیست، دانشگاه صنعتی ارومیه
۴. دانش آموخته کارشناس ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تولید سیمان یکی از صنایع پر مصرف انرژی در دنیا است و در بسیاری از مناطق دنیا ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌های مستقیم تولید سیمان مربوط به هزینه‌های انرژی است (Jiangfeng et al., 2009). انرژی مورد استفاده در صنعت تولید سیمان به دو بخش اصلی انرژی حرارتی یا گرمایی برای عملیات کلسینه-کردن، خشک‌کردن و پخت سیمان و انرژی الکتریکی برای خردایش، انواع فن‌ها و انواع موتورهای الکتریکی استفاده شده تقسیم می‌شود. از نظر تئوریکی برای تولید هر تن کلینکر حداقل ۱/۶ گیگا ژول گرما لازم است (Liu et al., 1995) اما در عمل، مقدار انرژی ویژهٔ مصرفی برای کارخانه‌هایی با کوره‌های مدرن در حدود ۲/۹۵ گیگاژول بر تن است و این رقم در برخی کشورها به ۵ گیگاژول بر تن نیز می‌رسد (Khurana et al., 2002). همچنین، برای تولید هر تن سیمان در حدود ۱۱۰ الی ۱۲۰ کیلووات ساعت انرژی برق مصرف می‌شود (Alsop, 2001). شکل ۱ سهم انرژی مصرفی توسط هر یک از فرایندهای تولید یک کارخانهٔ سیمان را نشان می-دهد (Khurana et al., 2002).



شکل ۱. سهم مصرف انرژی واحدهای مختلف یک کارخانه تولید سیمان (Khurana et al., 2002)

خردایش کلینکر آخرین و پر مصرف‌ترین مرحلهٔ تولید سیمان است که به تنهایی حدود ۴۰ درصد از کل انرژی لازم برای تولید یک تن سیمان را مصرف می‌کند. در این مرحله مواد خام پخته شده در کورهٔ سیمان به همراه مواد افزودنی مثل گچ در آسیای گلوله‌ای (لوله‌ای) سیمان آسیاب می‌گردد تا محصول نهایی که همان سیمان است بدست آید. هدف از خردایش کلینکر رسیدن به یک اندازهٔ معینی از ریزی (دانه-بندی) در محصول نهایی است که بتواند ویژگی‌های مطلوب آن نظیر سرعت هیدراتاسیون، مقاومت فشاری، آب محتوی و غیره را تامین نماید. خردایش کمتر، سبب تولید سیمانی دانه درشت‌تر از سیمان مورد نظر شده و در نتیجه عمل هیدراتاسیون سیمان، زمان گیرش مقاومت نهایی بتن و غیره را دچار مشکل خواهد کرد. از طرف دیگر، خردایش بیش از حد، تولید سیمانی دانه ریزتر از سیمان مورد نظر کرده که این کار می‌تواند منجر به گیرش بسیار سریع و احتمالا گیرش کاذب بتن، افزایش سرعت هیدراتاسیون، افزایش سرعت آزاد شدن حرارت و فاسد شدن سریعتر بتن در معرض هوا گردد. همچنین با ریزتر شدن ذرات، خردایش آنها مشکل‌تر شده و با مصرف زیاد انرژی همراه می شود که منجر به افزایش هزینه-های خردایش و همچنین آلودگی بیشتر محیط زیست می-گردد.

به منظور کنترل کیفیت در صنعت سیمان نیاز به دانستن توزیع دانه بندی محصول تولیدی است. در صنعت سیمان معمولا به جای توزیع دانه بندی از درصد مانده روی الک استفاده می شود. از طرفی، دانستن توزیع دانه بندی سیمان در پیش بینی رفتار سیمان در بتن ساخته شده نیز بسیار مهم می باشد. اما از آنجا که اندازه گیری توزیع دانه بندی سیمان کاری بسیار سخت و هزینه بر است معمولا از پارامتر دیگری که "درجهٔ نرمی سیمان" یا " مساحت سطحی ویژه" و یا اندازهٔ بِلِین (Blaine Value) نامیده می شود استفاده می شود (مهتا و مونته ئیرو، ۱۳۸۵). لذا می توان نتیجه گرفت که به هنگام مقایسهٔ راندمان خردایش چند حالت یا نمونهٔ مورد مطالعه؛ استفاده از یک عدد شاخص و معرف بهتر از یک دامنهٔ ابعادی گسترده است. در واقع، اندازهٔ بِلِین عبارت از اندازهٔ نسبی توزیع دانه بندی ذرات در سیمان بوده و عبارت از مجموع مساحت های تمام ذرات واحد جرم سیمان بر حسب سانتی متر مربع بر گرم است (ASTM, 2018). این پارامتر با استفاده از روش تراوایی یا نفوذ پذیری هوا اندازه گیری می شود (ASTM C204) و اساس کار این دستگاه بر اساس مکش

مقدار معینی هوا از طریق یک سطح پرداخت شدهٔ سیمان با تخلخل معین است که در آن تعداد و اندازهٔ سوراخها در این سطح پرداخت شده تابعی از اندازه ذرات و شدت عبور جریان از طریق سطح است.

عدد بلین در صنعت سیمان اهمیت بسیار بالایی در مراحل تولیدی و عملیاتی استفاده از سیمان را دارد. با توجه به اینکه واکنش بین اجزاء سیمان با آب و محیط پیرامون یک واکنش فیزیکو شیمیایی است، لذا نقش سطح ذرات در راندمان کلی این واکنش‌ها و رسیدن به شرایط مطلوب حائز اهمیت است. اهمیت این پارامتر در آن است که سرعت واکنش اولیهٔ سیمان با آب (تشکیل بتن) در ۲۴ ساعت اول به طور مستقیم وابسته به مساحت سطحی ویژه است و مساحت سطحی ذرات با میزان هیدراتاسیون رابطهٔ مستقیمی دارند و به همین خاطر سیمان دانه ریز مقاومت اولیهٔ بتن را افزایش داده و بسیار سریعتر از سیمان دانه درشت‌تر گرما تولید می‌کند.

در صنعت سیمان تاثیر عدد بلین از دو دیدگاه قابل بررسی است: دیدگاه اول از منظر خردایش است که در آن هدف افزایش راندمان سیستم خردایش با توجه به صرفه‌جویی انرژی و یا افزایش دبی آسیا برای عدد بلین مورد نظر کارخانه می‌باشد. دیدگاه دوم از منظر ویژگی‌های بتن ساخته شده از سیمان مورد نظر است که در آن ویژگی‌هایی نظیر مقاومت فشاری، کششی، زمان گیرش و غیره مد نظر قرار می‌گیرد.

در بسیاری از صنایع خردایش مواد معدنی که به روش خشک انجام می‌گیرد، جهت افزایش ظرفیت آسیا، کاهش انرژی ویژهٔ مصرفی و یا افزایش ریزی محصول مقداری مادهٔ شیمیایی به صورت مایع به آسیا افزوده می شود. در برخی مواقع نیز، این مواد افزودنی جهت تسهیل انتقال مواد و یا افزایش برخی از خصوصیات محصول نظیر مقاومت فشاری و زمان گیرش سیمان مورد استفاده قرار می گیرند (ASTM, 2018; Assaad, 2015). تحقیقات زیادی بر روی استفاده از مواد شیمیایی افزودنی، الیاف شیمیایی و مواد معدنی افزودنی نظیر انواع آمین ها، اتیلن‌ها، گلیکول‌ها، پزولان‌ها، پومیس‌ها، سیلیکات‌ها، تاثیر سنگ دانه‌ها و غیره برای بهبود خواص سیمان – بتن توسط محققین داخلی (شریفی و همکاران، ۱۳۹۲؛ شعبان زاده، ۱۳۹۲؛ اصغری ترانچه، ۱۳۹۵؛ علیلو، ۱۳۹۷؛ امینی و همکاران، ۱۳۹۹) و خارجی (Mardulier, 1961; Locher and Von Seebach, 1972; Scheible et al., 1974; Sohoni et al., 1991; Weibel and Mishra, 2014; Altun et al., 2015; Oksuzoglu and ucurum, 2016; Przwara et al., 2018; Toprak et al., 2018) انجام شده است.

نوع خاصی از این مواد افزودنی کمک خردایش‌ها هستند که دارای تاثیر فراوانی بر روی کیفیت نهایی، ویژگی‌های سیمان تولیدی و راندمان سیستم خردایش کارخانه‌های سیمان هستند و کاهش انرژی مصرفی مدارهای خردایش با استفاده از این مواد امری ثابت شده است (Lai et al., 2013; Toprak et al., 2014). بنابراین، تاثیرات مواد افزودنی در صنعت سیمان در دو بخش جداگانه قابل بررسی است: بخش اول مربوط به مراحل تولید سیمان و دیگری مربوط به مرحلهٔ کاربرد سیمان است. در مرحلهٔ تولید سیمان، استفاده از این مواد افزودنی تحت عنوان کمک خردایش صورت می‌گیرد، زیرا هدف اصلی این مواد کاهش انرژی ویژهٔ مصرفی (انرژی مصرف شده به ازای واحد وزن) در تولید سیمان و یا افزایش ظرفیت کارخانه با حفظ خصوصیات مورد نظر سیمان تولید شده می‌باشد. بعبارت بهتر، هدف از افزایش راندمان خردایش، افزایش میزان خردایش (تولید محصول دانه ریزتر) با دبی و توان مصرفی ثابت و یا کاهش توان مصرفی آسیا با ثابت نگه داشتن میزان خردایش و دبی آسیا است. اما، در مرحلهٔ مصرف سیمان، مواد افزودنی بیشتر از دیدگاه بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی بتن تولید شده حائز اهمیت هستند و بهبود خواصی نظیر مقاومت فشاری و کششی، زمان گیرش و غیره بعنوان هدف در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه افزودن برخی مواد شیمیایی در مرحلهٔ تولید می‌تواند خصوصیات بتن تولید شده را تحت تاثیر قرار دهد، بنابراین بایستی به طور همزمان اثرات مادهٔ افزودنی در مرحلهٔ تولید – مصرف مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرند. با توجه به اهمیت این دو دیدگاه در تولید و مصرف سیمان، لزوم ایجاد یک نقطهٔ بهینهٔ اقتصادی (صرفه

جویی انرژی و یا افزایش دبی آسیا) – مصرفی (برآورد ویژگیهای مورد نظر بتن) حائز اهمیت فراوانی است.

با وجود انجام بررسی ها و تحقیقات زیاد در مورد مزایای استفاده از کمک خردایش ها و مواد شیمیایی افزودنی در مطالعات آزمایشگاهی و صنعتی، تاکنون چگونگی تاثیر اجزاء کمک خردایش های تجاری بر ویژگیهای مختلف محصول بصورت کامل شناخته شده نمی باشد (Toprak et al., 2014). بدین سبب نیز درک صحیحی از مکانیسم‌ها و واکنش‌های بین سطوح ذرات و مولکول‌های کمک خردایش ایجاد نشده است و این امر نیز موجب آمپریک پایه ای بودن (کاربرد موردی در هر کارخانه) کاربردهای کمک خردایش شده است. در نتیجه در تحقیقات مختلف انجام شده با کمک خردایش های مشابه هم، علیرغم داشتن یک روند مشابه در نتایج، در مقدار نتایج و تفسیر آنها تفاوتهایی دیده می‌شود. در واقع، تنوع مواد به کار برده شده و تاثیرهای متفاوت آنها توسعه و بسط یک درک و رویکرد جامع و کامل را مشکل کرده است (Sverak et al., 2013). در حالت کلی می‌توان تاثیر کمک خردایش ها بر صنعت سیمان را به صورت زیر خلاصه کرد:

- استفاده از مواد افزودنی شیمیایی موجب کاهش نیروهای واندروالس بین ذرات شده (که این نیز موجب کاراتر شدن عمل شکست می‌شود) و بر ویژگی‌های خردایش ذرات تاثیری ندارند (Locher and Von Seebach, 1972).
- کاهش نیروهای واندروالس ناشی از افزودن کمک خردایش‌ها موجب افزایش سیالیت مواد جامد می شود که این نیز بصورت مستقیم به زمان ماند مواد در داخل آسیا تاثیر دارد (Mardulier, 1961).
- استفاده از کمک خردایش‌ها می‌تواند دبی مدار را (تا ۲۴ درصد در این منبع) افزایش دهد (Toprak et al., 2014).
- استفاده از کمک خردایش‌ها باعث کاهش انرژی سطحی سنگ‌آهک می‌شود. به خاطر کاهش انرژی سطحی، سایز آگلومره شدن (سایز تجمع ذرات ریز و تشکیل یک ذرهٔ بزرگتر) کاهش یافته و این نیز باعث افزایش سیالیت پودر (مواد خرد شده) می-شود (Sohoni et al., 1991; Prziwara et al., 2018).
- استفاده از کمک خردایش باعث کاهش پوشش بر روی پوستهٔ آسیا به خصوص هنگام خردایش کلینکر و سنگ آهک شده و یک شرایط عملیاتی پایدار را فراهم می‌سازد و به همین خاطر نیز تمایل به آگلومراسیون کاهش می‌یابد (Scheible et al., 1974; Sohoni et al., 1991).
- کمک خردایش ها موجب کاهش انرژی آگلومراسیونی که با راندمان خردایش همبستگی معکوس دارد می‌شوند (Weibel and Mishra, 2014).
- استفاده از کمک خردایش انرژی ویژهٔ مصرفی را کاهش می‌دهد (Oksuzoglu and ucurum, 2016; Prziwara et al., 2018; Toprak et al., 2018).
- در عملیات خردایش سیمان که در یک محیط خشک انجام می‌گیرد، مهمترین مشکل تمایل به آگلومراسیون ذرات بسیار ریز خرد شده می باشد که با استفاده از کمک خردایش می‌توان بر آن غلبه کرد (Austin, 1984).

اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول، تری اتانول آمین، اولئیک اسید و آمینو استات از جمله مهمترین کمک خردایش هایی هستند که تا کنون در خردایش سیمان مورد استفاده واقع شده اند (Toprak et al., 2014).

با توجه به اینکه حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد هزینه های عملیاتی تولید سیمان مربوط به خردایش نهایی سیمان است، لذا، بهینه سازی خردایش محصول نهایی سیمان با در نظر گرفتن کیفیت مورد نظر در بتن تاثیر بسیار زیادی در قیمت تمام شدهٔ سیمان تولیدی خواهد داشت. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی توام خردایش بهینه سیمان و مقاومت فشاری بتن بعنوان شاخصهٔ کیفیت سیمان با استفاده از کمک خردایش های

موجود در بازار است. در این تحقیق اثر چهار نوع کمک خردایش (آمین پایه و نیترات‌کلسیم پایه) با سطوح مختلف بر روی سه ویژگی بسیار مهم سیمان یعنی مساحت سطحی ویژهٔ (عدد بلین) سیمان تولیدی، مقاومت فشاری بتن تولیدی و صرفه جویی انرژی در فرآیند خردایش کلینکر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بدین منظور، پس از نمونه‌برداری صنعتی و آماده سازی نمونه‌ها، خردایش سنیتیکی بر روی نمونهٔ مرجع (بدون کمک خردایش) برای بدست آوردن زمان خردایش لازم جهت رسیدن به عدد بلین مورد نظر کارخانه (t) که به عنوان زمان خردایش بهینه در نظر گرفته می شود انجام گردید. با تهیهٔ نمونه‌های کمک خردایش‌دار و با توجه به مقادیر وزنی نمونه – کمک خردایش، تستهای خردایش با زمان خردایش (t) بر روی تمامی نمونه‌های خام و کمک خردایش دار انجام گردیده و عدد بلین آنها تعیین شدند. سپس، محاسبهٔ راندمان خردایش و یا مقدار صرفه‌جویی انرژی برای انواع ترکیب‌های کمک خردایش دار با استفاده از مدل باند (Bond, 1952) انجام گردید. در نهایت آزمایش مقاومت فشاری استاندارد بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از تمامی نمونه‌های سیمان انجام شده و تاثیر نوع و مقدار کمک خردایش مصرف شده بر روی بتن حاصل مورد بررسی قرار گرفت. تمامی آزمایش‌های بعمل آمده در این پروژه در آزمایشگاه‌های کارخانهٔ سیمان ارومیه، دانشگاه ارومیه و دانشگاه صنعتی ارومیه انجام شده‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. *مشخصات کلینکر کارخانهٔ سیمان ارومیه*

در فلوشیت کارخانهٔ سیمان ارومیه، کلینکر پس از افزودن گچ و سایر مواد افزودنی وارد آسیای کلینکر می‌شود. محصول خردایش شده پس از خروج از آسیا وارد جداکننده‌های مدار شده و سیمان نهایی (پرتلند تیپ ۱) با مساحت سطحی ویژه یا عدد بلین ۳۶۳۶ سانتی متر مربع بر گرم تولید می‌شود. مشخصات کلی سیمان تولیدی پرتلند تیپ ۱ کارخانهٔ سیمان ارومیه به صورت جدول ۱ است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۱ کارخانهٔ سیمان ارومیه

Chemical composition	LOI	Na_2O	K_2O	MgO	SO_4	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_4	CaO
Amount, %	2/08	0/23	1/11	1/70	2/54	3/09	4/89	20/67	63/56

۲-۲. *فرآیند انجام آزمایشها*

تمامی آزمایش های این تحقیق بر روی نمونه های آماده شده از ترکیب کلینکر خوراک آسیای کلینکر کارخانهٔ سیمان ارومیه، گچ و سایر افزودنی های این کارخانه اجرا شده است. با توجه به برنامه ریزی انجام شده در این تحقیق، نیاز به ۱۳ نمونه – ترکیب برای انجام آزمایش ها است. یک نمونه مربوط به انجام آزمایش بدون کمک خردایش و دوازده نمونه برای انجام آزمایش های خردایش با استفاده از ۴ کمک خردایش مختلف در ۳ سطح متفاوت هستند. با توجه به ظرفیت آسیای آزمایشگاهی مورد استفاده، مقدار نمونهٔ استفاده شده برای هر تست خردایش ۱ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. از طرفی مقدار نمونهٔ سیمان لازم برای تستهای مقاومت فشاری در ۳ زمان مختلف (بتن ۲، ۷ و ۲۸ روزه) بین ۵/۵ تا ۶ کیلوگرم تخمین زده می شود (با در نظر گرفتن دانسیتهٔ سیمان و نسبت سیمان: سنگ دانه: آب). بنابراین، برای تامین حجم کافی هر ترکیب سیمان – کمک خردایش نیاز به ۶ آزمایش تکراری خواهد بود که برای این کار از هر ترکیب ۶ نمونه حاضر شده و به مدت زمان تعیین شده عملیات خردایش انجام می گیرد. اندازه گیری توزیع دانه بندی و عدد بلین هر ۶ نمونه ضرورتی ندارد اما برای افزایش دقت داده ها و جلوگیری از خطاهای پیش بینی نشده، از هر ۶ نمونه ۳

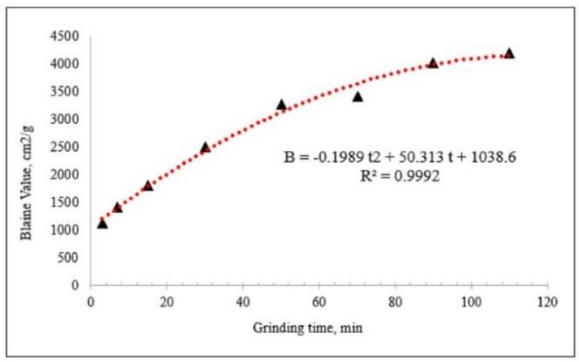
نمونه بصورت تصادفی انتخاب و مقدار متوسط عدد بلین آنها به عنوان عدد بلین آن ترکیب در نظر گرفته خواهد شد.

برای تهیهٔ نمونه های مناسب برای انجام آزمایش های خردایش، بهترین حالت استفاده از خوراک آسیای کلینکر صنعتی است. برای این کار از خوراک آسیای کلینکر کارخانهٔ سیمان ارومیه نمونه برداری گردید. سپس با توجه به ترکیب شیمیایی سیمان ارومیه افزودنی های لازم نظیر گچ، اکسیدها و غیره با درصدهای مناسب اضافه گردید تا خوراکی شبیه به خوراک آسیا بدست آید.

در این پروژه ترکیب مواد استفاده شده دقیقا منطبق بر ترکیب استفاده شده در مقیاس صنعتی است اما توزیع دانه–بندی استفاده شده ریزتر از مقیاس صنعتی انتخاب شده است. خوراک آسیای صنعتی دارای F_{100} (اندازه ای که ۱۰۰ درصد مواد از آن کوچکتر هستند) برابر ۵۰ میلیمتر است. در صورتیکه از این خوراک در آسیای آزمایشگاهی استفاده شود، بعلت کم بودن قطر آسیای آزمایشگاهی و کوچک بودن اندازهٔ گلوله های استفاده شده در آن، میزان شکست این خوراک درشت (خوراک آسیای کلینکر صنعتی) بسیار کم و یا طی زمان خردایش بسیار طولانی اتفاق خواهد افتاد و این کار نیز موجب ایجاد خطای زیاد در مقادیر تخمین زده شده و آنالیز نتایج خردایش خواهد شد. از آنجائی که تولید خوراکی با توزیع دانه بندی یکسان و مشابه بسیار سخت است، بنابراین نیاز به یک پارامتر مشخصه برای ایجاد ارتباط بین توزیع دانه بندی مقیاس های صنعتی و آزمایشگاهی ضروری است که مهمترین این شاخصه اندازه ای است که تمامی ذرات کوچکتر از آن باشند (F_{100}). بنابراین، بهترین کار استفاده از خوراک یکسان برای تمامی آزمایش ها است به نحوی که ترکیب مواد آن مشابه ترکیب استفاده شده در مقیاس صنعتی و اندازهٔ آن تناسبی از نسبت قطرهای آسیاها و نسبت F_{100} های خوراک های آسیاها باشد. قطر آسیای کلینکر کارخانهٔ سیمان ارومیه و قطر آسیای آزمایشگاهی استفاده شده به ترتیب ۴۶۰ و ۲۲/۴ سانتی متر و F_{100} خوراک آسیای کلینکر صنعتی ۵۰ میلیمتر هستند، بنابراین استفاده از خوراکی با F_{100} تقریبا ۲/۴۴ میلی متری برای تمامی آزمایشها می تواند نتیجهٔ مطمئن تری را ارائه دهد. برای استاندارد کردن نتایج، نزدیکترین سرند آزمایشگاهی به عدد ۲/۴۴ یعنی سرند ۲/۳۶ میلی متر بعنوان سرند F_{100} انتخاب شده است.

برای آماده سازی ترکیب اولیهٔ سیمان برای تست های آزمایشگاهی، ابتدا ترکیب خوراک آسیای صنعتی کارخانهٔ سیمان ارومیه (ترکیب کلینکر، گچ و مواد افزودنی) آماده شده و سپس این ترکیب با استفاده از سنگ شکن فکی آزمایشگاهی تا زیر ۲/۳۶ میلی متر خرد شده است. مواد آماده شدهٔ زیر ۲/۳۶ میلی متر معرف خوراک استفاده شده برای تمامی تست های آزمایشگاهی خواهد بود. همانطور که ذکر شد، با توجه به برنامه ریزی انجام شده برای انجام مطالعات، نیاز به ۱۳ نمونه – ترکیب با ۶ تکرار در هر نمونه – ترکیب است، بنابراین نیاز به آماده سازی ۷۸ نمونهٔ یک کیلوگرمی با F_{100} زیر ۲/۳۶ میلیمتر است که این نمونه ها با استفاده از جدا کنندهٔ ریفل و نمونهٔ اولیهٔ حاضر شده تهیه شده اند.

در این تحقیق برای بدست آوردن زمان بهینهٔ خردایش، هشت آزمایش خردایش سنتیکی با زمان های ۳، ۷، ۱۵، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ دقیقه بر روی نمونهٔ تهیه شدهٔ بدون کمک خردایش انجام شده است. سپس عدد بلین هر یک از زمان های خردایش تعیین و نمودار عدد بلین – زمان خردایش آزمایش ها رسم شد (شکل ۲).



شکل ۲. نمودار عدد بلین –زمان خردایش آزمایشات سنتیکی

برای افزایش دقت نتایج بدست آمده، این آزمایش ۳ بار تکرار گردید و مقدار متوسط عدد بلین بدست آمده برای هر یک از

زمان ها بعنوان عدد بلین معرف آن زمان در نظر گرفته شد. با توجه به رابطهٔ ریاضی بدست آمده زمان رسیدن به عدد بلین ۳۶۳۶ سانتی مترمربع بر گرم محاسبه گردید که برابر ۷۸/۲۴ دقیقه می باشد.

با بدست آوردن زمان خردایش مورد نیاز برای رسیدن به عدد بلین مورد نظر کارخانه (t) که همان زمان خردایش بهینه است، تمامی آزمایشات بعدی به مدت ۷۸/۲۴ خردایش شده و نتایج بدست آمده برای عدد بلین ها، مقاومت های فشاری و کارایی های انرژی با یکدیگر مقایسه خواهند شد. در این تحقیق برای انجام تمامی آزمایش های خردایش از آسیای گلوله ای با مشخصات مندرج در جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات آسیای آزمایشگاهی

Parameter	Unit	Symbol	amount
Diameter	cm	D	22/40
Length	cm	L	30/50
Mill rotational speed	rpm	S	80/00
Fraction of mill critical speed		C_S	90/15
Ball Mass	kg	M_b	11/41
Ball diameter	mm	d_{b1} (40/78%)	30/00
		d_{b2} (32/65%)	25/40
		d_{b3} (13/54%)	19/96
		d_{b4} (8/37 %)	14/95
		d_{b4} (4/66 %)	10/00
Make Up Ball	mm	Dc	20/61
Mill Volume	cm3	V_m	12011/60
Ball filling	%	J_b	22/61
Material filling	%	J_o	8/31

از آنجا که ترکیبات شیمیایی کمک خردایش های تجاری نامعلوم است و از طرف دیگر نیز اطلاعات کاملی در مورد چگونگی تاثیر کمک خردایش ها بر خواص سیمان و بتن وجود ندارد، لذا توصیف و تفسیر نتایج حاصل از کمک خردایش های تجاری بسیار سخت و همراه با فرضیات خواهد بود. بنابراین، استفاده از کمک خردایش های با ترکیبات شیمیایی معلوم نظیر آمین ها، گلیکول ها، الکل ها و غیره برای کارهای تحقیقاتی بسیار مفید خواهد بود. با در نظر گرفتن این نکته، در این پروژه از ۴ نوع کمک خردایش مطابق جدول ۳ برای انجام آزمایش های خردایش و مقاومت فشاری استفاده شده است.

جدول ۳. کمک خردایش ها و مقادیر استفاده شدهٔ آنها

Grinding Aid type	Dosage, %	Sample Code
Without the Grinding Aid	0	Blunk
Triisopropanolamine based	0/02	TIPA-0.02
	0/05	TIPA-0.05
	0/08	TIPA-0.08
Triethanolamine based	0/02	TEA-0.02
	0/05	TEA-0.05
	0/08	TEA-0.08
Hydroxylamine based	0/02	HA-0.02
	0/05	HA-0.05
	0/08	HA-0.08
Calcium nitrate based	0/02	NC-0.02
	0/05	NC-0.05
	0/08	NC-0.08

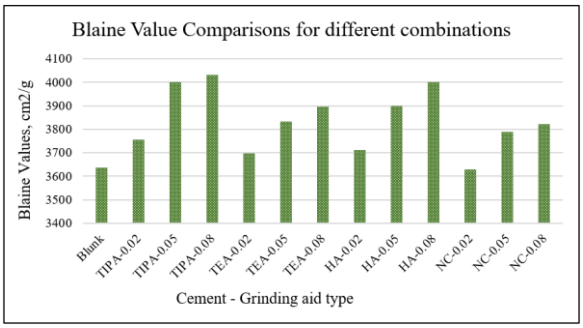
با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده برای سطوح مختلف کمک خردایش ها که برای همهٔ کمک خردایش ها ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد وزنی کل نمونه است، میزان افزایش کمک خردایش به نمونه های هر یک از سطحها به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ گرم خواهد بود (وزن کل نمونه ۱ کیلوگرم است). با داشتن این اطلاعات نمونه ها برای انجام تستهای خردایش و مقاومت آماده سازی شده است.

۳. نتایج آزمایش ها

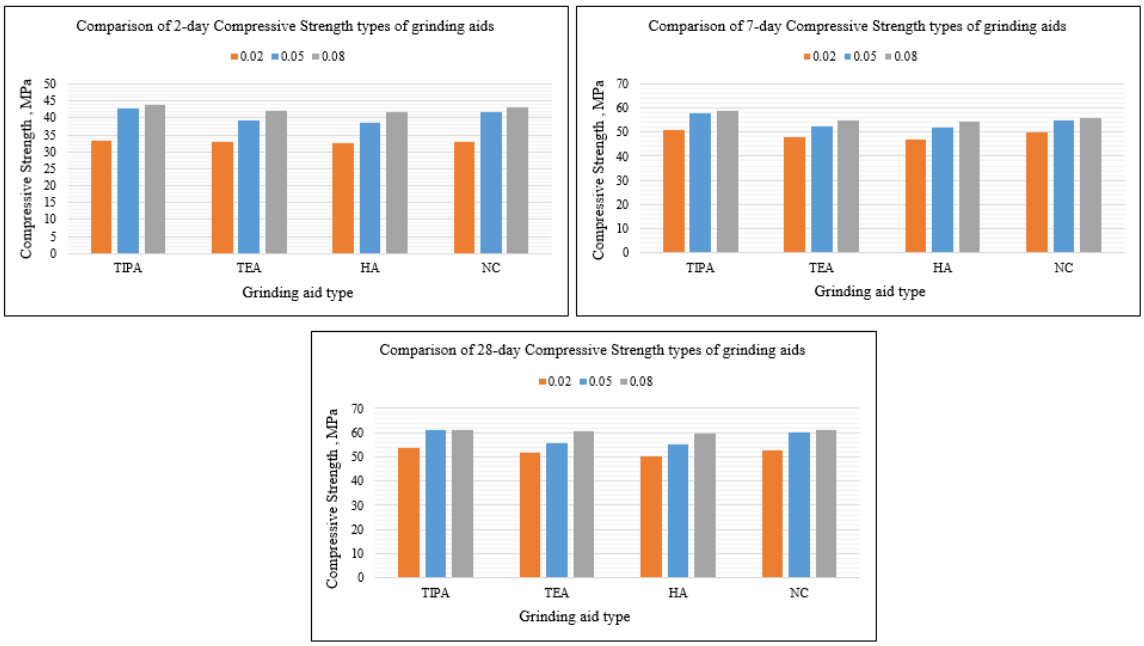
۳-۱. آزمایشهای خردایش و عدد بلین نمونه-ترکیب‌ها

بر روی تمامی نمونه‌های آماده‌سازی شده که حاوی مقادیر متفاوت کمک خردایش‌های مختلف بودند، آزمایش خردایش خشک با زمان ۷۸/۲۴ دقیقه انجام گردید. با توجه به مقدار

جرمی بسیار کم کمک خردایش های استفاده شده در هر نمونه (حداکثر ۸ گرم)، افزودن مستقیم این مواد به نمونهٔ حاضر شده و خردایش آن می تواند باعث ایجاد خطا بعلت عدم حضور مواد شیمیایی افزوده شده در برخی از نقاط آسیا شود. بنابراین یک راهکار کلی تولید یک ترکیب آبی از کمک خردایش مورد نیاز برای هر نمونه است به نحوی که مقدار آب موجود در آن تاثیر بسیار ناچیزی در خواص رئولوژیکی مواد داخل آسیا داشته باشد. با آماده کردن ترکیب آبی مورد نظر برای هر نمونه، ابتدا مواد وارد آسیا شده، سپس با توجه مقدار کمک خردایش در نظر گرفته شده ترکیب آبی به صورت اسپری روی مواد پاشیده می شود. در نهایت درب آسیا بسته شده و عملیات خردایش در زمان مورد نظر انجام می گیرد. برای هر نمونه – ترکیب ۶ آزمایش تکراری انجام شد تا حجم سیمان نمونهٔ لازم برای آزمایش‌های مقاومت فشاری نیز فراهم شود. برای افزایش دقت داده‌ها و حذف خطاهای احتمالی، ۳ نمونه از این ۶ نمونه به طور تصادفی انتخاب و عدد بلین آنها تعیین گردید و سپس مقدار متوسط این سه عدد بعنوان شاخص بلین آن نمونه – ترکیب معرفی شد. در مجموع ۷۸ آزمایش خردایش انجام شده و ۱۳ عدد بلین معرف برای هر نمونه – ترکیب تهیه شده از ترکیب سیمان – کمک خردایش-ها بدست آمد. جمع بندی نتایج حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مقایسهٔ عدد بلین های بدست آمده ازخردایش ترکیب های مختلف سیمان – کمک خردایش

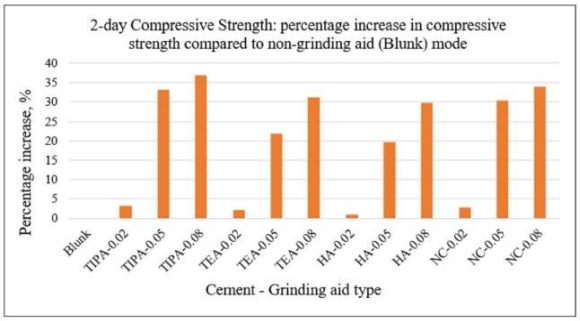


شکل ۴. نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف

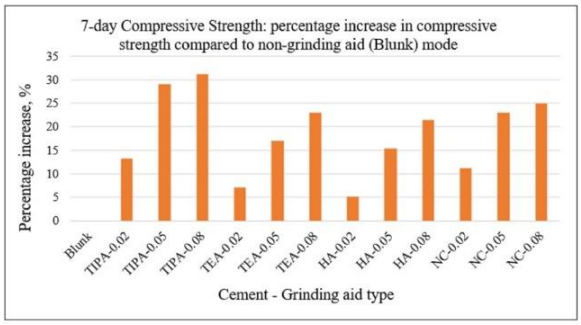
۳-۲. *آزمایش های مقاومت فشاری بر روی نمونه حاصل از سیمان نمونه-ترکیب ها*

آزمایش مقاومت فشاری مهمترین تست انجام شده بر روی بتن می باشد که علت این امر راحتی و ارزان بودن این تست است (Mindess et al., 2003).

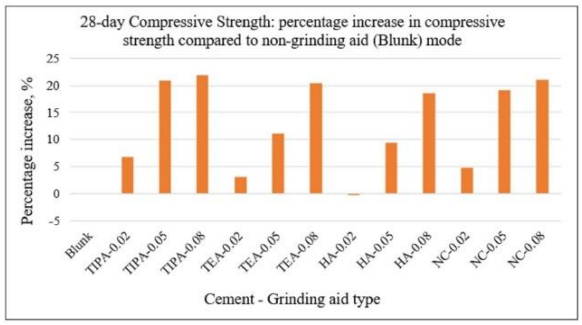
برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن از نمونه های با اشکال و اندازه های مختلف می توان استفاده کرد. مهمترین شکل استفاده شده برای این آزمایش نمونه های استوانه ای به قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلیمتر و نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلیمتر می باشند که نمونه های اولیه بیشتر در آمریکا و نمونه های دومی در اروپا و بریتانیا مورد استفاده قرار می گیرند (Kim and Seong-Tae, 2002). در این تحقیق از نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی متر و طرح اختلاط با نسبت سنگدانه: سیمان: آب برابر ۳: ۱: ۰/۵ استفاده گردید. با توجه به وجود ۱۳ نمونه – ترکیب و در نظر گرفتن ۳ زمان دو، هفت و بیست و هشت روزه برای آزمایش های مقاومت فشاری، در مجموع ۳۹ بلوک با ترکیب سیمان – کمک خردایش متفاوت ساخته شده و آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها انجام گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری مطابق اشکال ۴ تا ۷ می باشد.



شکل ۵. درصد افزایش مقاومت فشاری ۲ روزه نمونه‌های مختلف



شکل ۶. درصد افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های مختلف



شکل ۷. درصد افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مختلف

۳-۳. راندمان خردایش و مقدار صرفه جویی در انرژی خردایش برای انواع ترکیب‌های کمک خردایش دار

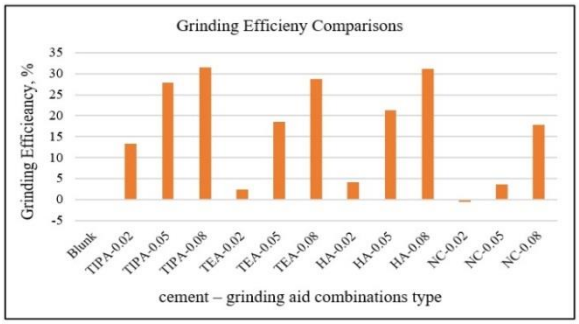
تاثیر کمک خردایش‌ها در راندمان خردایش در دو قالب کلی الف) افزایش میزان خردایش (تولید محصول دانه ریزتر) با دبی و توان مصرفی ثابت آسیا و یا ب) کاهش توان مصرفی آسیا با ثابت نگه داشتن میزان خردایش و دبی آسیا قابل بررسی است. در آزمایش‌های انجام شده در این پروژه وزن تمامی نمونه‌ها و زمان خردایش آنها ثابت و به ترتیب برابر یک کیلوگرم و ۷۸/۲۴ دقیقه بوده است. بنابراین ثابت بودن وزن نمونه‌ها و زمان خردایش به معنی ثابت بودن دبی و توان مصرفی آسیای آزمایشگاهی است. از طرفی خوراک استفاده شده برای همهٔ آزمایش‌ها نیز یکسان و دارای توزیع دانه بندی مشابه بوده است، لذا راندمان خردایش در این آسیا از دیدگاه میزان خردایش (تولید محصول دانه ریزتر) قابل بررسی خواهد بود. محاسبهٔ مقدار انرژی لازم برای خردایش مواد معدنی با استفاده از رابطهٔ باند انجام شده است (معادلهٔ ۱) (Bond, 1952). در این راستا، برای محاسبهٔ اندیس کار آسیای گلوله‌ای باند از روش خردایش سنتیکی حسین زاده قره قشلاق (Hosseinzadeh Gharehgheshlagh, 2016) که بر مبنای روش اندیس کار باند (معادلهٔ ۲) طراحی شده است، استفاده شد.

$$W = 10W_i\left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right) \qquad (۱)$$

$$W_i = \frac{48.95}{D^{0.23}\, G_{bp}^{0.82}\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)} \qquad (۲)$$

که در این معادلات؛ W_i، F_{80}، P_{80}، G_{bp} و D به ترتیب برابر اندیس کار باند (کیلووات ساعت بر تن)، اندازه ای که ۸۰٪ خوراک کوچکتر از آن است (میکرون)، اندازه ای که ۸۰٪ محصول از آن کوچکتر است (میکرون)، قابلیت خردایش (گرم بر دور) و اندازهٔ سرند کنترلی (میکرون) بوده و W برابر مقدار انرژی یا کار لازم برای خردایش سیمان (کیلووات ساعت بر تن) می باشد.

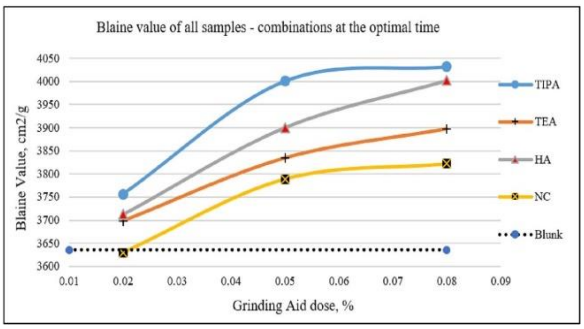
با مقایسهٔ مقادیر انرژی یا کار لازم برای خردایش بدست آمده برای هر یک از ترکیب‌های سیمان – کمک خردایش، مقدار صرفه‌جوئی انرژی محاسبه شده است. در روش حسین‌زاده قره قشلاق، با انجام خردایش سنتیکی و ایجاد روابط ریاضی بین پارامترهای مدل اندیس کار باند، مقدار اندیس کار گلوله ای باند حساب می‌شود که این مقدار برای نمونهٔ استفاده شده در این تحقیق برابر ۱۳/۲۱ کیلووات ساعت بر تن تعیین شد. در این تحقیق با در دست داشتن اندیس کار، F_{80} خوراک اولیه (مواد زیر ۲/۳۶ میلی‌متر)، P_{80} هر یک از ترکیب‌های سیمان – کمک خردایش و معادلهٔ باند مقدار انرژی یا کار لازم برای خردایش سیمان محاسبه شده است. در نهایت نیز مقدار صرفه جوئی انرژی به ازاء P_{80} های مختلف و با مبنا قرار دادن انرژی مصرفی حالت بدون کمک خردایش، برای تمامی حالت ها بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۸).



شکل ۸. مقایسهٔ مقادیر صرفه‌جویی انرژی بدست آمده ازخردایش ترکیب‌های مختلف سیمان – کمک خردایش

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر چهار نوع کمک خردایش شیمیایی در ۳ سطح مختلف ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد بر روی مقاومت فشاری بتن و میزان انرژی صرفه‌جویی شده در خردایش کلینکر بررسی شده است. افزودن کمک خردایش ها باعث کاهش آگلومراسیون ذرات خرد شده و رفع پوشش گلوله‌های خرد کننده در داخل آسیای کلینکر می‌شود و این کار باعث افزایش میزان خردایش به ازاء توان مصرفی معین می‌گردد و یا به ازاء یک توان ورودی ثابت آسیا، انرژی خردایش ویژه کاهش می‌یابد. افزودن کمک خردایش‌ها باعث ریزتر شدن محصول تولیدی آسیا شده و مساحت سطحی ویژهٔ محصول یا همان عدد بلین را افزایش می‌دهد و این کار باعث افزایش راندمان خردایش آسیاها می‌شود. در این تحقیق با بدست آوردن زمان بهینهٔ خردایش، عملیات خردایش بر روی تمامی نمونه – ترکیب‌ها انجام و عدد بلین آنها تعیین شده است (شکل ۹).



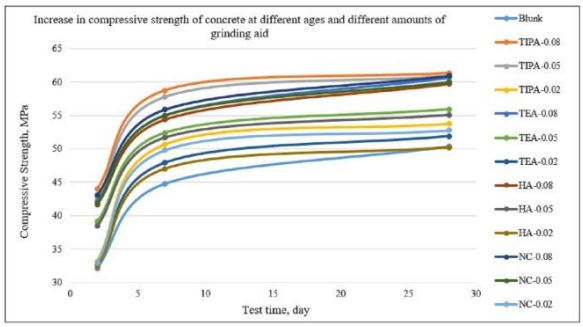
شکل ۹. عدد بلین حاصل از عملیات خردایش بر روی تمامی نمونه – ترکیب‌ها در زمان بهینهٔ تعیین شده

نتایج حاصل از آزمایش‌های خردایش انجام شده، نشان دهندهٔ افزایش راندمان خردایش آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی تا ۳۱/۵۷ درصد به ازاء انواع مختلف کمک خردایش‌ها و سطحهای متفاوت است (بغیر از NC-0.02).

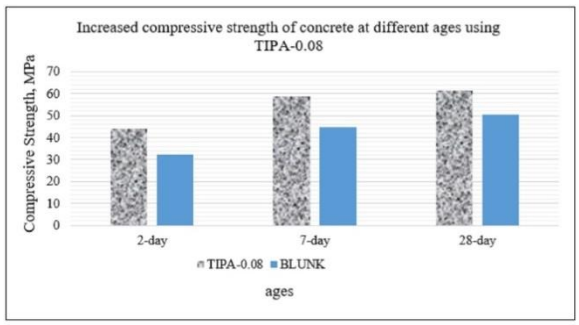
نتایج حاصل از آزمایش‌های خردایش نشان می‌دهد غیر از ترکیب نیترات کلسیم ۰/۰۲ درصد (NA-0.02) در بقیهٔ موارد افزودن کمک خردایش منجر به ریزی محصول نهایی شده است و با افزایش سطح کمک خردایش‌ها نیز افزایش ریزی محصول مشاهده شده است. البته این روند حالت خطی نداشته و پس از سطح مشخصی مقدار و روند تاثیر کمک خردایش کمتر می‌شود.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که در هر سه سطح ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ درصد استفاده شده افزایش ریزی محصول خردایش شده ناشی از کمک خردایش TIPA بیشتر از همه بوده است و بعد از آن به ترتیب کمک خردایش‌های HA، TEA و NC در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. بیشترین افزایش ریزی مربوط به ترکیب تری ایزوپروپانول آمین ۰/۰۸ درصد (TIPA-0.08) است که در آن عدد بلین به ۴۰۳۲ سانتی مترمربع بر گرم افزایش یافته است. علت این امر می‌تواند قدرت زیاد کمک خردایش‌های TIPA – پایه ای در کاهش قطبیت سطح کلینکر و بالطبع آن کاهش انرژی سطحی کلینکر باشد (Altun et al., 2015). از طرف دیگر با افزایش مقدار کمک خردایش‌ها راندمان خردایش نیز افزایش می یابد زیرا با افزایش سطح کمک خردایش سرعت کاهش انرژی سطحی نیز افزایش می‌یابد (Sverak et al., 2013).

از طرف دیگر، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان می دهد که ریزتر شدن سیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن در تمامی سنین مورد آزمایش می‌شود. سیمان دانه ریزتر به همراه آب وارد فضاهای خالی ترکیب سیمان – سنگدانه شده و نسبت فضای خالی به حجم کل بتن را کاهش می‌دهد و این کار باعث افزایش مقاومت فشاری سیمان می‌شود. همچنین واکنش بین ترکیبات شیمیایی مختلف موجود در کمک خردایش‌ها با ترکیبات اصلی سیمان و آب نیز سبب بهبود مقاومت فشاری سیمان می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان دهندهٔ افزایش مقاومت فشاری بتن در تمامی سنین تست شده توسط کمک خردایش‌های مختلف و مقادیر متفاوت آنها می باشد (شکل ۱۰). بیشترین افزایش در کاربرد ترکیب TIPA-0.08 با ۳۶/۹۲ درصد افزایش برای مقاومت ۲ روزه، ۳۱/۲۳ درصد برای مقاومت ۷ روزه و ۲۱/۸۵ درصد برای مقاومت ۲۸ روزه بدست آمده است (شکل ۱۱).



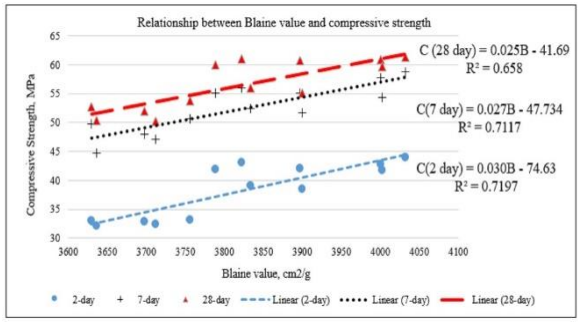
شکل ۱۰. درصد افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف و مقادیر متفاوت کمک خردایش



شکل ۱۱. میزان افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف با کاربرد ترکیب TIPA-0.08

شایان ذکر است که میزان تاثیر TIPA در افزایش مقاومت فشاری بتن در سطحهای پایین اندک است و حتی در برخی از منابع کاهش مقاومت فشاری بتن تا کمی کمتر از مرجع نیز مشاهده شده است، این امر احتمالاً به اثر حجم منافذ و هوای نفوذ (Ma et al., 2018) مربوط می‌شود. TIPA می تواند حجم منافذ مضر (در ابعاد میکرو و نانومتر) را افزایش دهد که احتمالا تاثیر منفی بر مقاومت فشاری می‌گذارد. از طرف دیگر تاثیر TIPA در مقاومت فشاری ۲ و ۷ روزه بیشتر از مقاومت ۲۸ روزه است و مقدار افزایش بیشتری در سنین پایین بتن مشاهده می شود که علت این امر اینست که TIPA می‌تواند هیدراتاسیون مواد معدنی سیمان را تسریع بخشد و به هرحال، با افزایش بیشتر در میزان TIPA، اثر هوا برای تسریع هیدراتاسیون سیستم بتن نیز می‌تواند ارتقاء یابد. دلیل دیگر این است که TIPA همچنین می تواند انحلال سیلیکات، آهن و آلومینات را تسریع نماید و این امر می‌تواند تشکیل هیدراتید کلسیم یولفوآلومینات را به منظور پر کردن منافذ

بتن و کمک به مقاومت فشاری، سریعتر کند (Ma et al., 2018).



شکل ۱۲. رابطه عدد بلین و مقاومت فشاری بتن را در ۲-۷-۲۸ روز

به هرحال، نتایج حاصل از آزمایش‌های خردایش و مقاومت فشاری بتن، نشان دهندهٔ یک توافق نسبی بین راندمان خردایش – مقاومت فشاری بتن هستند و همانطوریکه در شکل ۱۲ دیده می‌شود افزایش ریزی ذرات باعث افزایش مقاومت فشاری در تمامی سنین بتن شده است. اما میزان این تاثیر در مقاومت ۲ و ۷ روزه بیشتر از مقاومت ۲۸ روزه است. در هرصورت باید توجه داشت که غیر از عدد بلین سیمان، وجود ترکیبات شیمیایی مختلف در انواع کمک خردایش‌ها و تاثیر واکنش این اجزاء با اجزاء سیمان و آب نیز بر روی مقاومت فشاری موثر هستند.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزودن این ترکیبات شیمیایی باعث افزایش مقاومت فشاری تمامی نمونه ها شده و در نتیجه معیار کیفیت سیمان را بهبود بخشیده اند. از طرفی نتایج نشاندهندهٔ افزایش کارایی خردایش تمام نمونه ها هستند (بغیر از NC-0.02). لذا با توجه افزایش عدد بلین نمونه ها توسط این مواد شیمیایی، می توان گفت که تاثیر افزایش این مواد بر روی کیفیت سیمان و هزینه های خردایش و در نتیجه قیمت تمام شدهٔ سیمان بسیار چشمگیر بوده و ضرورت توسعهٔ مطالعات مربوطه را طلب می کند. در این مطالعه، بیشترین کارایی مربوط به استفاده از ترکیب TIPA-0.08 است که باعث افزایش ۱۰/۸۹ درصدی در کارایی خردایش و افزایش ۳۶/۹۲ درصدی در مقاومت فشاری ۲ روزه شده است.

منابع

اصغری ترانچه، م.، ۱۳۹۵. بررسی تاثیر افزودنیهای کمک خردایش بر فرآیند آسیاکنی کلینکر سیمان در آسیای گلوله ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان.

امینی، ح.، سعیدی رضوی، ب.، احمدی، ج.، بابایی، م.، ۱۳۹۹. ارزیابی تاثیر درصد ماسه های شکسته استاندارد بر روی ویژگیهای بتن خود متراکم. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد سیزدهم، شماره ۱ ، صفحه ۱۰۳ تا ۱۱۸.

شریفی، ج.، نیکودل، م.، یزدانی، م.، ۱۳۹۲. تأثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگدانه ها بر مقاومت بتن. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، شماره ۱ و ۲، صفحه ۶۷ تا ۸۲

شعبان زاده، ع.، ۱۳۹۲. بررسی اثر افزودنی شیمیایی بهبود دهنده کیفیت و کمک سایش بر خواص محصول و عملکرد تولید در آسیاب های سیمان شرکت سیمان شرق. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد شاهرود.

علیلو، م.، ۱۳۹۷. بررسی نقش کمک ساینده های آلی و معدنی بر کاهش انرژی مصرفی و افزایش مقاومت فشاری در سیمان خوی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه.

مهتا، پ.، مونته ئیرو، پ.، ترجمه: رمضانیانپور، ع.ا.، قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، ۱۳۸۵. ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

Alsop, P., 2001. Cement plant operations handbook for dry process plants. Portsmouth, United Kingdom, Tradeship Publications Ltd.

Altun, O., Benzer, H., Toprak, A., Enderle, U., 2015. Utilization of grinding aids in dry horizontal stirred milling. Powder Technology, 286: 610–615.

Assaad, J.J., 2015. Quantifying the effect of clinker grinding aids under laboratory conditions. Minerals Engineering, 81: 40–51.

ASTM C150 / C150M-18, 2018. Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM C204-18e1, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.

Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T., 1984. Grinding aids, in: Process Engineering of Size Reduction Ball Milling. New York, Society of Mining Engineers, AIME: 385–406.

BOND, F.C., 1952. The Third Theory of Comminution. Transaction AIME (Mining) 193: 484-494.

Hosseinzadeh Gharehgheshlagh, H., 2016. KINETIC GRINDING TEST APPROACH TO ESTIMATE THE BALL MILL WORK INDEX. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 52(1): 342−352.

Jiangfeng, W., Yiping, D., Lin, G., 2009. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry. Applied Energy, 86: 941–948.

Khurana, S., Banerjee, R., Gaitonde, U., 2002. Energy balance and cogeneration for cement plant. Applied Thermal Engineering, 22: 485–94.

Kim, J.k., Seong-Tae, Y., 2002. Application of size effect to compressive strength of concrete members. India 27 (4): 467–484.

Lai, F.C., Karim, M.R., Jamil, M., Zain, M.F.M., 2013. Production yield, fineness and strength of cement as influenced by strength enhancing additives. Aust. J. Basic Appl. Sci., 7 (4): 253 – 259.

Liu, F., Ross, M., Wang, S., 1995. Energy efficiency of China's cement industry. Energy, 20 (7): 669–81.

Locher, F., Von Seebach, H.M., 1971. Influence of Adsorption Industrial Grinding, Industrial and Engineering Chemistry. Process Design and Development, 11: 190.

Ma, B., Zhang, T., Tan, H., Liu, X., Mei, J., Qi, H., Jiang, W., Zou, F., 2018. Effect of triisopropanolamine on compressive strength and hydration of cement-fly ash paste. Construction and Building Materials, 179: 89-99.

Mardulier, F.J., 1961. Proc. Am. Soc. Testing Mater. 61: 1078.

Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D., 2003. Concrete. 2nd Ed., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Oksuzoglu, B., Ucurum, M., 2016. An experimental study on the ultra-fine grinding of gypsum ore in a dry ball mill. Powder Technology, 291: 186–192.

Prziwara, P., Breitung-Faes, S., Kwade, A., 2018. Impact of grinding aids on dry grinding performance, bulk properties and surface energy. Advanced Powder Technology, 29: 416-425.

Scheible, W., Hoffmann, B., Dombrovwe, H., 1974. Einige Probleme des Einsatzes von Mahlhilfsmitteln in der Zementindustrie (Some problems of the use of grinding aids in the cement industry). Communicated by Tamás, F.D., Cem. Concr. Res., 4: 289–298.

Sohoni, S., Sridhar, R., Mandal, G., 1991. The effect of grinding aids on the fine grinding of limestone, quartz and Portland cement clinker. Powder Technology, 67: 277– 286.

Sverak, T.S., Baker, C.G.J., Kozdas, O., 2013. Efficiency of grinding stabilizers in cement clinker processing. Minerals Engineering, 43 (44): 52–57.

Toprak, N.A., Altun, O. Benzer, A.H., 2018. The effects of grinding aids on modeling of air classification of cement. Construction and Building Materials, 160: 564-573.

Toprak, N.A., Altun, O., Aydogan, N., Benzer, H., 2014. The influences and selection of grinding chemicals in cement grinding circuits. Constr. Build. Mater., 68: 199–205.

Weibel, M., Mishra, R.K., 2014. Comprehensiv understanding of grinding aids. Zement-Kalk-Gips, 6: 28–39.