



# تأثیر کمک سایشها بر فرآیند خردایش در صنایع سیمان، آهک و سرامیک

تهیه و تدوین: مهندس محسن یعقوبی (شرکت سیمان اردستان)  
مهندس فریدون رحمانی (شرکت سیمان یاسوج)

## چکیده:

در این بررسی اثرات ۷ کمک سایش با نام‌های تری اتانول آمین (TEA)، مونو و دی اتیلن آمین (MEG و DEG)، اسید اولئیک (OA)، سدیم اولئات (SO)، بخار باطله سولفیت (WSL) و دو دسیل بنزن سولفونیک اسید در خردایش کلینکر سیمان پرتلند، سنگ آهک و کوارتز در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول آزمایشات خردایش ملاحظه شد که نرم کردن مواد مذکور بدون استفاده از کمک سایش بستگی به سختی موس آن‌ها دارد. کوتینگ بالای گلوله‌ها و لاینرها منجر به جلوگیری از خردایش ریزتر کلینکر سیمان و سنگ آهک می‌گردد، در حالی که کوارتز باریزتر شدن، چنین رفتاری را از خود نشان نمی‌دهد و پیوسته نرم‌تر می‌شود.

اگرچه همه کمک سایش‌های مورد مطالعه در میزان‌های متفاوتی تأثیر گذار بودند، اما در خردایش کوارتز تأثیر ناچیزی داشتند و به طرز چشمگیری در خردایش کلینکر و سنگ آهک موثر و کارا بودند. از میان کمک سایش‌های مورد مطالعه، به نظر می‌رسید تأثیر تری اتانول آمین (TEA) از همه بیشتر بود. در خردایش کلینکر سیمان، گچ به عنوان یک کمک سایش خیلی تأثیر گذار عمل می‌کرد. مکانیزم و فعالیت این افزودنی‌ها از توانایشان برای جلوگیری از نشست کوتینگ روی گلوله و پوسته آسیا و به هم چسبندگی مواد نشات می‌گیرد.

## مقدمه

بازدهی اغلب واحدهای خردایش پایین است. یکی از دلایل این امر را می‌توان در تجمع و چسبیدن ذرات نرم شده و کوتینگ روی لاینر و گلوله‌های آسیا دانست. افزودنی‌هایی مانند آب، مایعات ارگانیکی و بعضی الکترولیت‌های غیرارگانیکی برای کاهش انرژی سطحی مواد خرد شده با این هدف که سبب افزایش بازدهی خردایش شوند، مورد استفاده قرار گرفته است. مواد شیمیایی مورد استفاده در صنعت سیمان که باعث افزایش ظرفیت خردایش می‌شوند، «کمک سایش» نامیده می‌شوند.

خردایش ریز در صنایع سیمان و سرامیک بخش مهمی از انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. در صنعت سیمان، در حدود ۷۵٪ مصرف انرژی کل برای کاهش ابعاد است که ۸۵٪ این انرژی برای خردایش مصرف می‌شود. کلینکر، سنگ آهک و مواد مشابه در صنعت سیمان موادی هستند که نیاز به سنگ‌شکنی و خردایش دارند. کوارتز نیز از مواد معمول در صنایع سرامیک به شمار رفته که به شکل‌های ریز به مصرف می‌رسد. بنابراین زیاد عجیب نیست که مراجع گوناگون، برای خردایش کلینکر، سنگ آهک، کوارتز و دیگر مواد مورد استفاده در صنایع آهک و سرامیک بر استفاده از تجهیزات پیشرفته یا کمک سایش‌ها تأکید کرده‌اند. برای خردایش سنگ آهک، تری اتانول آمین و دی اتیلن گلیکول، اسید اولئیک و اسید استئاریک، Na-lignate، بنزن، استن و متانول به عنوان کمک سایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور مثال افزودن کمتر از اسید اولئیک نرمی مواد خردایش شده را به میزان افزایش می‌دهد. بعضی از الکترولیت‌های غیرارگانیکی مثل  $\text{NiCl}_2$ ،  $\text{FeCl}_3$  و  $\text{NaCl}$  برای خردایش تر سنگ آهک مزایای زیادی داشته‌اند. استفاده از عوامل متفرق ساز نظیر کربنات سدیم، سیلیکات سدیم و ترکیب کربنات سدیم - تری پلی فسفات سدیم ممکن است محتوای رطوبت بهینه پالپ را در روش خردایش تر سنگ آهک ظاهراً کاهش دهند، اما به هر حال بر روی حد خردایش تأثیر گذار هستند.

تری اتانول آمین، سدیم اولئات، آب، بخار باطله سولفیت، نفتنات سدیم و برخی الکترولیت‌های غیرارگانیکی در خردایش کوارتز مورد

استفاده قرار گرفته‌اند. به طور مثال افزودن سدیم اولئات ظرفیت خردایش مواد را دو برابر می‌کند.

افزودنی‌های مورد استفاده برای خردایش کلینکر سیمان پرتلند عبارتند از مونو و دی اتیلن گلیکول، مونو و دی و تری اتانول آمین، TDA، اسید اولئیک، سیلیکون‌های اورگانیک، استات‌های اورگانیک، کرین سیاه (ذغال سنگ) و سولفات کلسیم.

به نظر می‌رسد که از میان کمک سایش‌های مذکور تری اتانول آمین، اتیلن گلیکول، آمین استات، پروپیلن گلیکول و TDA مرتباً در صنعت سیمان مورد استفاده قرار گرفته است.

در این بررسی کار با ارزشی انجام گرفته است که تحقیق بر روی تأثیر کمک سایش‌های گوناگون را در خردایش کلینکر، سنگ آهک و کوارتز مورد بررسی قرار می‌دهد.

جهت بررسی فعالیت کمک سایش‌های مختلف، دو مکانیزم پیشنهاد شده است:

مکانیزم اولیه که به نام اثر *Rehbinder* شناخته شده است، بر این فرض استوار است که با جذب کمک سایش بر روی مواد داخل آسیا، انرژی آزاد سطحی کاهش می‌یابد. با کاهش انرژی آزاد سطحی، کمک سایش‌ها توسعه میکروتک‌های موجود در ذرات شکسته شده را بیشتر می‌کند (به علت برخوردی که از تجمع مواد با هم جلوگیری می‌کنند). این مکانیزم می‌تواند جلوگیری از کوتینگ روی گلوله‌ها و لاینر آسیا را نیز توجیه کند.

بنا به مکانیزم دوم که توسط *Westwood* و همکاران پیشنهاد شد، جذب کمک سایش‌ها سبب حرکت و متلاشی شدن لایه‌های نزدیک به سطح مواد می‌شود که این امر منجر به کاهش سختی (*hardness*) مواد می‌شود.

هدف از تحقیق صورت گرفته، مطالعه و ارزیابی تأثیر تعدادی از کمک سایش‌ها بر روی خردایش ریز سنگ آهک، کوارتز و کلینکر سیمان پرتلند است. برای این کار کمک سایش‌های زیر انتخاب شده‌اند: (۱) - تری اتانول آمین (۲) - مونو اتیلن گلیکول (۳) - دی اتیلن گلیکول (۴) - اسید اولئیک (۵) - سدیم اولئات (۶) - دو دیسل بنزن سولفونیک اسید و (۷) - بخار باطله سولفیت.

محدوده عملیاتی تحقیقات صورت گرفته در مقیاس آزمایشگاهی است، به نحوی که در انواع و مقادیر مختلف کمک سایش خردایش مواد مذکور در یک آسیای دو اتاقچه‌ای با گلوله‌های فولادی در زمان‌های مختلف انجام گرفته و به منظور مقایسه تأثیر شیمیایی کمک سایش‌ها، سطح بلین محصولات مورد مقایسه قرار گرفته است.

## آزمایشات

### مواد و خصوصیات

#### محاسبات پارامترهای عملیاتی آسیای گلوله‌ای

##### بار خرد کننده

گلوله‌های فولادی با دانسیته  $8500 \text{ kg/m}^3$  استفاده شده است. با در نظر گرفتن درجه انباشتگی آسیا (۳۰٪) (با فرض اینکه تخلخل شارژ گلوله معادل ۳۵٪ است)، شارژ کلی گلوله  $91/1 \text{ kg}$  در نظر گرفته شد.

سنگ آهک در سایزهای ۱۶- تا  $12 \text{ cm}$  و کوارتز نیز در ابعاد ۶- تا  $3 \text{ cm}$  تهیه شد. از همه مواد مورد آزمایش، آزمایشات وزن مخصوص، سختی و قابلیت خردایش به عمل آمد. برای کلینکر سیمان آنالیز دانه‌بندی نیز انجام شد. نظر به تعیین خصوصیات کلیدی، آنالیز شیمیایی از سنگ آهک و کوارتز با روش‌های استاندارد نیز به عمل آمد.

#### توزیع اندازه گلوله‌ها

ابعاد خوراک جهت خردایش در آسیا از ۲ تا  $5 \text{ mm}$  برای مواد مصرفی در سیمان و صنایع دیگر متغیر است. سایز بزرگترین گلوله به کار رفته در آسیا بر اساس فرمول باند که در ذیل آمده است، بر اساس اندازه خوراک ۲ تا  $3 \text{ mm}$  (منظور  $F_{80}$ )، ۵۰ میلیمتر محاسبه و در نظر گرفته شده است. سپس تصمیم بر آن بود که از سایزهای ۵۰، ۴۰ و  $30 \text{ mm}$  استفاده شود. متعاقباً، توزیع اندازه گلوله‌ها مطابق با روش پیشنهاد شده توسط باند محاسبه شد.

#### تجهیزات خردایش

یک آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی دو اتاقچه‌ای، قطر هر اتاقچه  $(D=500 \text{ mm})$  با طول  $(L=280 \text{ mm})$  برای آزمایشات خردایش در نظر گرفته شده است. حجم هر اتاقچه آسیا معادل  $55 \text{ liter}$  است. آسیای مذکور با یک موتور  $2/8 \text{ kw}$  با ترکیب گیربکس لازم در سرعت  $48 \text{ rpm}$  (معادل ۸۰٪ سرعت بحرانی) استارت می‌شود. یک انرژی سنج سه فاز با هدف اندازه‌گیری مصرف انرژی الکتریکی در زمان عملیات خردایش، به آسیا متصل شد.





بر اساس این محاسبه، درصد وزنی شارژ گلوله برای سایز ۵۰mm معادل ۳۶٪، ۴۰mm معادل ۳۸٪ و ۳۰mm معادل ۲۶٪ در نظر گرفته شد.

### آماده سازی خوراک و اندازه خوراک

سایز خوراک برای هر کدام از مواد بر اساس فرمول باند به شکل زیر محاسبه می شود:

$$B = \left( \frac{F}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{SW_i}{C_s \sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{معادله (۱)}$$

که B= اندازه گلوله ماکزیمم، F= اندازه ماکزیمم خوراک، K= نسبت ثابت، S= وزن مخصوص خوراک،  $W_i$ = اندیس باند،  $C_s$ = سرعت آسیا به سرعت بحرانی (که معادل با ۸۰,۲۵٪ است).

و  $D$  = قطر داخلی آسیا است. در معادله بالا، S و  $W_i$  برای هر کدام از مواد متغیر است، در حالی که پارامترهای دیگر ثابت است. در ابتدا مواد توسط یک سنگ شکن فکی خردایش شده و مورد آنالیز سرنندی قرار گرفت. اندازه دهانه سرنند معادل با اندازه ای است که از معادله (۱) دست می آید. مانده روی سرنند، مجدداً خردایش شده در حالی که عبوری از سرنند به عنوان خوراک ورودی به آسیا در نظر گرفته می شود. سایز ماکزیمم خوراک و اندازه مش انتخاب شده برای آنالیز سرنندی در جدول (۱) ارائه شده است. آنالیز سرنندی کلینکر سیمان (قبل از خردایش) در جدول (۲) ارائه شده است. خوراک آماده شده نیز (برای هر کدام از مواد) آنالیز سرنندی شده و در جدول (۳) ارائه شده است.

### جدول (۱) - محاسبه اندازه خوراک

نام نمونه	مواد	وزن مخصوص خوراک (S)	اندیس باند $W_i$ (kwh/t)	بزرگترین سایز گلوله (B)	ثابت تناسب (K)	% سرعت آسیا به سرعت بحرانی ( $C_s$ )	قطر داخلی آسیا (ft)	اندازه خوراک F ( $\mu m$ )	اندازه انتخاب شده ( $\mu m$ )
۱	سنگ آهک	۲/۶۹	۱۳/۲۳	۱/۹۶۸	۳۳۵	۸۰/۲۵	۱/۶۴	۲۶۳۶	۲۵۰۰
۲	کوارتز	۲/۶۵	۱۵/۰۰	۱/۹۶۸	۳۳۵	۸۰/۲۵	۱/۶۴	۲۴۴۴	۲۵۰۰
۳	کلینکر سیمان	۳/۱۵	۱۷/۵۴	۱/۹۶۸	۳۳۵	۸۰/۲۵	۱/۶۴	۱۹۶۲	۲۰۵۷

### جدول (۲) - آنالیز سرنندی کلینکر قبل از خردایش

شماره نمونه	اندازه چشمه الک ( $\mu m$ )	% وزنی مانده روی الک
۱	۱۵۰۰۰	۱۳/۸۰
۲	۱۰۰۰	۶/۰۲
۳	۵۰۰۰	۸/۳۲
۴	۲۵۰۰	۷/۹۹
۵	۱۰۰۳	۱۶/۶۵
۶	۵۰۰	۱۵/۵۹
۷	۳۰۰	۱۳/۳۲
۸	۱۵۰	۸/۱۲
۹	۹۰	۳/۰۴
۱۰	-۹۰	۷/۰۷
		$\Sigma \text{sum} = ۹۹/۹۲$

جدول (۳) - آنالیز سرندي کلينکر، سنگ آهک و کوارتز به عنوان خوراک ورودی به آسیا

شماره نمونه	اندازه چشمه الک ( $\mu\text{m}$ )	% وزنی مانده روی الک		
		سنگ آهک	کوارتز	کلینکر سیمان
۱	۲۰۵۷	۰/۲۶۹	۰/۲۷	-
۲	۱۰۰۳	۳۲/۳۸۰	۳۳/۸۷	۳۹/۱۲
۳	۵۰۰	۲۵/۶۳	۲۷/۱۰	۲۸/۵۶
۴	۳۰۰	۱۲/۴۵	۱۳/۸۳	۹/۱۱
۵	۱۵۰	۹/۶۳	۱۱/۷۳	۶/۸۹
۶	۹۰	۶/۶۶	۵/۰۹	۹/۱۵
۷	-۹۰	۱۳/۱۸	۸/۰۳	۷/۱۵
		۹۹/۹۹	۹۹/۹۲	۹۹/۹۸

### شارژ خوراک

پایان مدت زمان مشخص، آسیا متوقف شده و به منظور آزمایش سطح بلین، نمونه گیری شد. پس از اولین نمونه گیری، درب آسیا را مجدداً بسته و خردایش برای زمان بعدی به همین شکل ادامه یافت. این کار تا رسیدن به زمان ۶۱۰min ادامه می یابد. انرژی الکتریکی مصرف شده در طی مدت زمان خردایش توسط انرژی متر ثبت گردید.

پس از تکمیل مدت زمان های تعریف شده، محصولات خرد شده با گذاشتن یک صفحه مشبک به جای درب آسیا، خارج می شود و سپس برای مدت زمان کافی آسیا را استارت نموده تا مواد باقیمانده نیز خارج شده و بارهای خردکننده داخل آسیا بمانند. در این فرآیند، به علت مکانیزم سایشی گلوله ها در خلاف جهت یکدیگر و دیواره آسیا، کوتینگ از گلوله ها و لاینر آسیا برداشته می شود.

### تعیین سطح مخصوص

سطح مخصوص نمونه ها توسط دستگاه بلین مطابق با استاندارد IS: ۴۰۳۱-۱۹۶۸ تعیین شد. ملاحظه شد که در آزمایشات مقدماتی، وزن مخصوص مواد با افزایش مدت زمان های خردایش (احتمالاً به علت آلوده شدن مواد با آهن حاصل از بارهای خرد کننده و لاینر)، سیر صعودی نسبتاً آرامی را از خود نشان می دهد. بنابر این در هر دوره زمانی از خردایش وزن مخصوص نمونه ها محاسبه شده و بر اساس آن وزن ماده ای که برای آزمایش بلین مورد نیاز است، تعیین شد.

شارژ خوراک زمانی بهینه است که حجم بالک آن معادل شارژ گلوله باشد. شارژ خوراک می تواند طبق معادله زیر حساب شود: (تخلخل بستر خوراک-۱)×(دانسیته واقعی خوراک)×(کل فضای خالی موجود از شارژ گلوله)= شارژ خوراک

شارژهای خوراک برای هر اتاقچه از مواد مطابق با فرمول بالا به صورت ذیل به دست آمد:

سنگ آهک ۱۰/۳۵ kg، کوارتز ۱۰/۰۸ kg، کلینکر سیمان ۱۱/۲۶ kg.

### کمک سایش ها

همه کمک سایش های مورد مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی تهیه شده بودند. مقادیر مورد نیاز از این افزودنی ها به شکل خالص یا به صورت ۵۰٪ در محلول های مایع تهیه گردیدند. بخار باطله سولفیت مشتمل بر ۳۰٪ محتوی جامد است که از خمیرهای سلولزی کاغذ به دست می آید.

### آزمایشات خردایش

هر یک از اتاقچه های آسیا با بار خرد کننده و خوراک هایی که توسط آنالیز سرندي تهیه شده بودند، شارژ گردید. مقادیر هر یک از این آیتم ها مطابق با محاسبات انجام گرفته در بالاست. از کمک سایش ها نیز به مقدار لازم، به صورت خالص یا محلول به آسیا اضافه نموده و درب آسیا بسته می شود. سپس آسیا را استارت کرده و خردایش در مدت زمان های تعریف شده انجام می شود. پس از





## نتایج و بحث

آنالیز شیمیایی کوارتز و سنگ آهک در جدول (۴) نشان داده شده است:

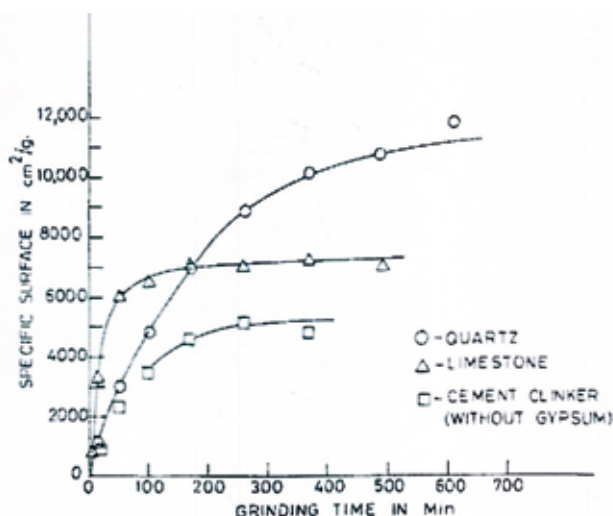
در حالی که از آنالیزهای X-ray برای تعیین فازهای موجود در نمونه‌ها بهره گرفته شده است، نتایج آنالیزهای شیمیایی، وزن مخصوص و سختی موس نیز به منظور تصدیق آنالیزها، مورد توجه است.

نمونه سنگ آهک عمدتاً از کانی کلسیت تشکیل شده است و مقادیر کمی از کوارتز نیز در نمونه موجود بوده است. آنالیز کوارتز نیز نشان داد که تقریباً از کوارتز  $\alpha$  تشکیل شده است. نمونه‌های کلینکر سیمان پرتلند نیز بیانگر حضور فازهای  $C_3S$ ،  $\alpha-C_2S$ ،  $C_3A$  و  $C_4AF$  است. پیک‌های کوچک شامل فاز محلول جامد سیلیکات کلسیم  $54CaO \cdot 10SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot MgO$  گزارش شده است. نمونه گچ نیز  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  به صورت فاز اصلی است، مقدار کمی کوارتز نیز می‌توانست در نمونه گچ موجود باشد.

جدول (۴) - آنالیز شیمیایی کوارتز و سنگ آهک

شماره نمونه	ترکیبات	% سنگ آهک	% کوارتز
۱	LOI	۳۸/۷۲	۰/۲۶
۲	SiO <sub>2</sub>	۹/۶۷	۹۹/۲۳
۳	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۷۸	-
۴	CaO	۴۹/۲۵	-
۵	Mgo	۰/۱	-

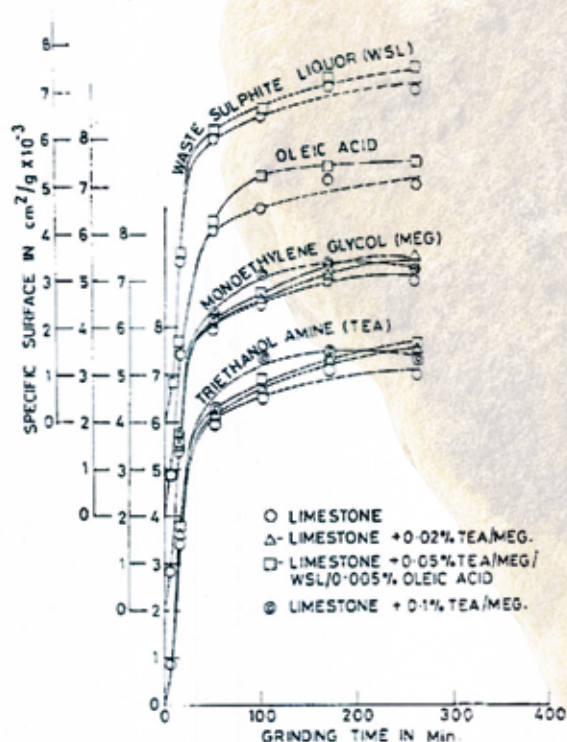
وجود کوتینگ بر سطح بارهای خردکننده و لاینر آسیا خبر می‌دهد. در حالی که برای کوارتز این کوتینگ پذیری به میزان کم گزارش شده است. بنابراین به نظر می‌رسد که در مراحل بعدی خردایش، نیروی چسبندگی بین مواد خردایش شده، فاکتور کنترلی محسوب می‌شود.



## خردایش بدون استفاده از افزودنی‌ها

نتایج نرمی مواد خردایش شده با و بدون استفاده از کمک سایش‌ها در جدول ۵-۷ و شکل ۱-۴ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل (۱) مشخص است سطح مخصوص حاصل از خردایش در زمان ۱۷۰ دقیقه برای سنگ آهک همیشه بالاتر از کوارتز است و این در حالتی است که سطح جدید حاصل از خردایش کلینکر (در همین زمان) همواره از دو کانی فوق‌الذکر کمتر بوده است. شایان ذکر است که عدد سختی موس برای سنگ آهک، کوارتز و کلینکر سیمان پرتلند به ترتیب ۴، ۷ و ۹ است. بنابراین در اینجا مشخص می‌شود که مواد با سختی بیشتر، سطح مخصوص کمتری را در خردایش تولید می‌کنند. به نظر می‌رسد که در مراحل اولیه خردایش، فاکتور کنترلی در فرآیند خردایش، سختی مواد است. بعد از گذشت ۱۷۰ دقیقه از زمان خردایش در حالی که سطح مخصوص روند ثابتی را دنبال می‌کند، سطح مخصوص کوارتز به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این روند افزایش برای کلینکر هم مصداق دارد. مشاهدات عینی از

شکل (۱) - خردایش کوارتز، سنگ آهک و کلینکر سیمان بدون افزودنی



شکل (۲) - تاثیر کمک سایش‌های مختلف بر خردایش سنگ آهک

### خردایش با افزودنیها

#### تاثیر کمک سایشها در خردایش سنگ آهک

در شکل (۲) نتایج حاصل از خردایش سنگ آهک با کمک سایش‌های OA, MEG, TEA و WSL نشان داده شده است. بررسی نمودارهای حاصله نشان می‌دهد که همه کمک سایشهای مورد آزمایش در درجات مختلفی، موجب بهبود و کارایی خردایش شده‌اند و در همه موارد بجز، بیشترین سطح مخصوص در بالاترین دوز حاصل شده است.

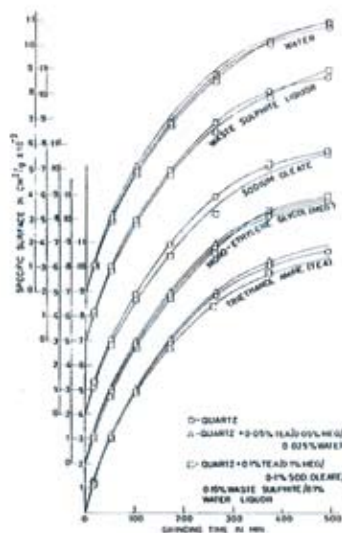
جدول (۵) - سطح مخصوص (بلین) به دست آمده با و بدون استفاده از کمک سایش در خردایش سنگ آهک

سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)											زمان خردایش (min )	شماره نمونه
سنگ آهک + WSL	سنگ آهک + OA		سنگ آهک + MEG			سنگ آهک + TEA				سنگ آهک		
از ۰.۵٪ ۳۰٪ محلول مایع	۰/۰۱٪ خالص	۰/۰۰۵٪ خالص	۰/۱٪ خالص	۰/۰۵٪ خالص	۰/۰۲٪ خالص	۰/۱٪ از ۵۰٪ محلول مایع	۰/۱٪ خالص	۰/۰۵٪ خالص	۰/۰۲٪ خالص			
۸۴۷	۷۸۰	۸۵۶	۸۳۲	۸۳۲	۸۳۲	۳۸۶۲	۸۳۲	۸۵۸	۸۴۷	۸۴۷	۵	۱
۳۵۷۵	۳۳۶۳	۳۷۲۵	۳۷۰۰	۳۵۶۳	۳۴۹۰	۳۷۱۵	۳۷۲۷	۳۷۶۳	۳۵۸۰	۳۴۱۸	۱۵	۲
۶۱۵۰	۵۷۶۵	۶۲۴۵	۶۲۸۵	۶۱۸۵	۶۰۹۳	۶۳۸۴	۶۲۳۷	۶۲۸۵	۶۱۷۳	۶۰۵۴	۵۰	۳
۶۶۵۹	۶۹۳۹	۷۲۵۰	۷۱۴۳	۶۷۲۵	۶۶۱۲	۷۱۷۳	۷۳۶۳	۶۹۲۴	۶۶۸۹	۶۵۳۹	۱۰۰	۴
۷۳۰۰	۶۹۹۶	۷۴۰۴	۷۳۵۰	۷۲۸۵	۷۱۷۸	۷۳۶۷	۷۴۸۵	۷۳۵۰	۷۲۸۹	۷۱۲۲	۱۷۰	۵
۷۴۹۲	۷۰۰۹	۷۵۰۰	۷۳۲۵	۷۵۲۵	۷۴۲۳	۷۳۲۱	۷۳۷۵	۷۶۷۳	۷۵۷۸	۷۰۲۱	۲۶۰	۶
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۷۲۲۲	۳۷۰	۷
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴۹۰	۸
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۶۱۰	۹





از میان ۳ دوز قابل استفاده TEA، بیشترین افزایش در بلین به میزان  $8.04 \text{ cm}^2/\text{gr}$  در دوز  $0.1\%$  در زمان خردایش ۱۰۰ دقیقه محقق گردیده است. اضافه می‌نماید بیشترین افزایش در میزان سطح مخصوص در زمان استفاده از MEG در دوز  $0.1\%$  به میزان  $\text{cm}^2/\text{gr}$  ۵۸۴ در زمان خردایش ۱۰۰ دقیقه بوده است. خردایش سنگ آهک فقط با  $0.05\%$  WSL افزایش سطح  $\text{cm}^2/\text{gr}$  ۴۷۱ در پایان ۲۶۰ دقیقه زمان خردایش در پی داشته است. اگرچه تأثیرات کلی OA مشابه با افزودنی‌های دیگر است، لکن تولید بیشترین سطح مخصوص در درجات پایین افزودنی حاصل می‌گردد. در مجموع دیده می‌شود از میان کمک سایش‌های مورد مطالعه، TEA از بقیه موثرتر بوده است.



شکل (۳) - تاثیر کمک سایش‌های مختلف بر خردایش کوارتز

### تاثیر افزودنی‌ها در خردایش کوارتز

نتایج خردایش کوارتز با مقادیر مختلفی از کمک سایش‌ها در شکل (۳) ارائه شده است.

با دقت در شکل می‌توان دریافت اگر چه به کارگیری دوزهای  $0.05\%$  از هر کدام از کمک سایش‌های TEA و MEG و  $0.25\%$  از آب شیر سبب بهبود ناچیزی در خردایش شده است، اما هیچ کدام از کمک سایش‌ها تأثیر قابل ذکر مخصوصی بر روی خردایش نداشته‌اند. حتی بایستی اشاره کرد که افزودن  $0.1\%$  SO و TEA به نظر می‌رسد سبب تأثیر منفی در فرآیند خردایش داشته باشد. همانگونه که اشاره کردیم کمک سایش‌ها معمولاً در مواردی موثر و کارا هستند که کوتینگ پذیری آسیا و گلوله زیاد و قابل ملاحظه باشد. در حالی که این امر در خردایش کوارتز بدون استفاده از کمک سایش‌ها، ملاحظه نشده و به نظر می‌رسد که کمک سایش‌ها، هیچ نقشی در خردایش کوارتز ایفا نمی‌کنند.

### جدول (۶) - سطح مخصوص (بلین) به دست آمده با و بدون استفاده از کمک سایش در خردایش کوارتز

شماره نمونه	زمان خردایش (min)	سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)										
		کوارتز (cm <sup>2</sup> /gr)			کوارتز+TEA			کوارتز+MEG		کوارتز + WSL	کوارتز+ آب	
		خالص	۰/۰۵٪	۰/۱٪	خالص	۰/۰۵٪	۰/۱٪	خالص	۰/۱٪	۰/۱۵٪ از ۳۰٪ محلول مایع	۰/۰۲۵٪	۰/۱٪
۱	۱۵	۱۱۳۲	۱۲۴۷	۱۲۴۷	۱۲۴۷	۱۲۱۲	۱۰۲۲	۱۲۶۱	۱۰۶۵	۱۱۷۹	۱۰۹۰	
۲	۵۰	۳۰۱۲	۳۱۱۷	۳۱۳۲	۳۰۳۱	۳۰۸۹	۲۷۱۸	۲۸۳۷	۲۸۵۴	۳۱۷۲	۲۹۷۹	
۳	۱۰۰	۴۹۰۴	۴۹۴۳	۵۰۲۶	۴۹۳۴	۵۰۱۲	۴۷۹۰	۴۶۶۷	۴۷۴۴	۵۱۴۳	۴۸۶۸	
۴	۱۷۰	۶۹۰۲	۶۷۰۶	۷۰۱۵	۶۷۶۱	۷۰۱۲	۶۷۶۲	۶۴۲۲	۶۷۶۰	۷۱۰۲	۶۷۶۰	
۵	۲۶۰	۸۸۶۷	۸۵۱۹	۸۹۸۲	۸۳۹۱	۸۹۵۷	۸۶۷۲	۸۱۷۸	۸۴۵۵	۸۷۷۰	۸۵۰۹	
۶	۳۷۰	۱۰۱۱۱	۹۵۸۰	۱۰۲۸۰	۹۷۸۰	۱۰۲۵۲	۱۰۰۹۶	۱۰۱۳۵	۹۹۰۴	۱۰۱۳۰	۱۰۱۸۴	
۷	۴۹۰	۱۰۷۲۵	-	-	-	-	-	-	۱۰۹۱۸	-	۱۰۹۱۰	
۸	۶۱۰	۱۱۸۵۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

### تأثیر افزودنیها در خردایش کلینکر سیمان پرتلند

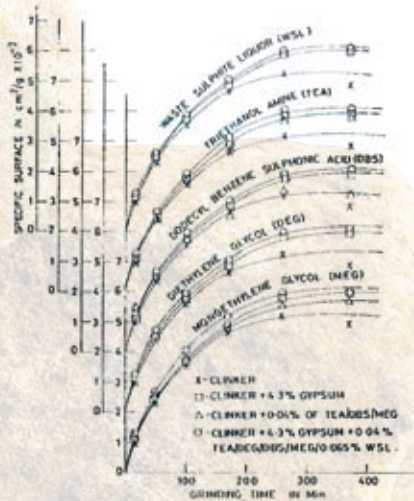


Fig. 4. Effect of various grinding aids on the grinding of Portland cement clinker

نتایج خردایش کلینکر سیمان پرتلند در شکل (۴) نشان داده شده است. محلولهای مایع کمک سایش به دلیل سهولت استفاده و تأثیر سریع، بیشتر مورد استفاده واقع شده‌اند. بایستی یادآور شد که سیمان‌سازی با کلینکر سیمان پرتلند از افزودن ۴/۳٪ گچ (که معادل با ۲٪ SO<sub>3</sub> است) انجام شده است. این مورد به خاطر این است که در صنعت، سیمان پرتلند با مقادیر مشابه از گچ خردایش می‌شود. از گزارشات پیشین در می‌یابیم که خود گچ تأثیر قابل ملاحظه‌ای را در خردایش کلینکر سیمان پرتلند ایفا می‌کند. در حقیقت این قضیه معادل با این مطلب است که نتایج به دست آمده با ۰/۰۴٪ از ۵۰٪ محلول مایع TEA (بدون استفاده از گچ) قابل مقایسه با استفاده از ۴/۳٪ گچ (بدون استفاده از هیچ گونه کمک سایش و افزودنی) است (مراجعه به ستون ۳ و ۴ در جدول ۷)، از آن جهت که نتایج حاصل از خردایش کلینکر با افزودن ۴/۳٪ سنگ گچ معادل با افزودن ۰/۰۴٪ TEA است، بی‌درنگ افزودن گچ به لحاظ اقتصادی مزیت‌های بیشتری دارد. به هر حال همه کمک سایش‌ها یک اثر اضافی بر روی خردایش کلینکر سیمان پرتلند همراه با گچ می‌گذارند، اگر چه نتایج آن را نشان ندهند. در مورد سنگ آهک به طور واضح ملاحظه شد، کمک سایش‌ها هیچ اثری بر روی کوتینگ‌های آسیا و گلوله ندارند. شکل‌ها همچنین نشان داد از میان همه کمک سایش‌های به کار گرفته شده، TEA و DEG نتایج بهتری نسبت به بقیه داشته‌اند.

شکل (۴) - تأثیر کمک سایش‌های مختلف بر خردایش کلینکر سیمان

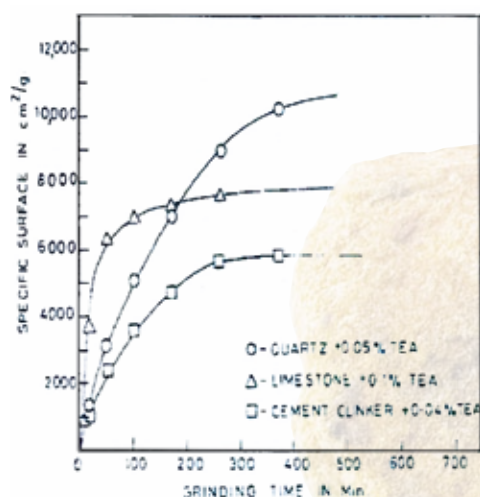
### جدول (۷) - سطح مخصوص (بلین) به دست آمده با و بدون استفاده از کمک سایش در خردایش کلینکر

سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)										زمان خردایش (min)	
۰/۰۶۵ % WSL (۳۰% محلول مایع) + کلینکر ۴/۳ + گچ %	۰/۰۴ % DBG (۵۰% محلول مایع)		۰/۰۴ % DEG (۵۰% محلول مایع)		۰/۰۴ % MEG (۵۰% محلول مایع)		۰/۰۴ % TEA (۵۰% محلول مایع)		کلینکر + گچ ۴/۳	کلینکر	
	کلینکر + گچ ۴/۳ %	کلینکر	کلینکر + گچ ۴/۳ %	کلینکر	کلینکر + گچ ۴/۳ %	کلینکر	کلینکر + گچ ۴/۳ %	کلینکر			
۱۲۳۸	۱۱۹۷	۱۴۹۵	۱۲۰۹	۱۰۴۰	۱۲۷۲	۱۱۹۳	۱۲۸۳	۱۰۷۸	۱۱۲۰	۹۸۶	۱۵
۲۵۵۸	۲۶۲۵	۲۴۸۴	۲۶۶۵	۲۳۷۸	۲۶۶۳	۲۵۷۱	۲۵۹۹	۲۴۱۵	۲۴۴۶	۲۳۵۴	۵۰
۳۸۰۵	۳۹۳۹	۳۶۸۹	۳۹۳۷	۳۷۴۷	۴۰۵۹	۳۷۷۵	۳۹۰۱	۲۶۴۳	۳۶۹۴	۳۵۵۰	۱۰۰
۴۹۹۶	۴۹۷۰	۴۴۹۱	۵۰۵۸	۴۸۵۹	۵۱۷۵	۴۷۱۱	۵۰۸۶	۴۷۶۸	۴۸۵۹	۴۶۵۸	۱۷۰
۵۸۸۷	۵۸۶۹	۵۳۶۸	۵۹۴۶	۴۹۰۳	۵۹۵۳	۵۵۳۲	۶۰۴۳	۵۶۸۹	۵۷۹۳	۵۱۸۱	۲۶۰
۶۰۱۲	۶۰۷۱	۵۱۹۸	۶۰۶۴	۴۹۴۹	۵۹۱۲	۵۶۵۳	۶۰۸۸	۵۸۳۶	۵۹۳۹	۴۸۵۴	۳۷۰





## بحث های عمومی



شکل (۵)- خردایش کوارتز، سنگ آهک و کلینکر سیمان با TEA

در جدول (۸) اطلاعات کاملی راجع به بهترین نتایج حاصل شده استفاده از کمک سایش ها در مورد سنگ آهک، کوارتز و کلینکر سیمان پرتلند ارائه شده است. چنین بر می آید که در خردایش کلینکر سیمان پرتلند و سنگ آهک، TEA و MEG بیشترین تأثیرات را از خود بروز داده اند، حال آنکه به مقدار اندک و ناچیزی این مطلب در مورد کوارتز صادق است. برخی از بهترین نتایج حاصل شده راجع به سنگ آهک، کوارتز و کلینکر سیمان پرتلند در شکل (۵) نشان داده شده است. از مقایسه این شکل با شکل (۱) می توان به نتایج ذیل دست یافت: (i) طبیعت و ذات منحنی خردایش هر سه مواد مذکور با و بدون استفاده از کمک سایش ها بدون تغییر می ماند. (ii) استفاده از TEA دامنه خردایش کوارتز را افزایش نمی دهد. (iii) استفاده از TEA محدوده خردایش کلینکر سیمان پرتلند و سنگ آهک را افزایش می دهد، حال آنکه این اثر بخشی برای کلینکر بیشتر است. پیشتر بحث شد که این اثر بخشی بر اساس کوتینگ پذیری آسیا و گلوله است که در مورد کلینکر بیشتر بوده و بنابراین تأثیر کمک سایش بیشتر است، به همان ترتیب برای سنگ آهک کمتر و برای کوارتز بدون تأثیر است.

جدول (۸)- بیشترین افزایش سطح مخصوص حاصل شده با TEA و MEG در خردایش سنگ آهک، کوارتز و کلینکر

شماره نمونه	کمک سایش	مواد	غلظت کمک سایش %	زمان خردایش (min)	بیشترین افزایش در سطح مخصوص (cm²/gr)
۱	TEA	سنگ آهک	۰/۱	۱۰۰	۸۰۴
		کوارتز	۰/۰۵	۳۷۰	۱۶۹
		کلینکر بدون گچ	از ۰/۰۴ ۵۰٪ محلول مایع	۲۶۰	۵۰۸
		کلینکر با ۴/۳٪ گچ	از ۰/۰۴ ۵۰٪ محلول مایع	۲۶۰	۲۵۰
۲	MEG	سنگ آهک	۰/۱	۱۰۰	۵۸۴
		کوارتز	۰/۰۵	۳۷۰	۲۸۵
		کلینکر بدون گچ	از ۰/۰۴ ۵۰٪ محلول مایع	۲۶۰	۳۵۱
		کلینکر با ۴/۳٪ گچ	از ۰/۰۴ ۵۰٪ محلول مایع	۱۰۰	۳۶۵

می‌شود) مبهم و مورد تردید باشد. به هر حال اگر خردایش مواد خام یا کلینکر سیمان فراتر از بلین  $4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  صورت پذیرد، استفاده از کمک سایش می‌تواند دارای مزایای مشخص و حتمی باشد. علاوه بر این اگر اثر کمک سایش‌ها را بر روی عوامل و خصوصیتی همچون نسبت  $W/C$ ، افزایش مقاومت ملات و ... مورد بررسی قرار دهیم، ارزشمندتر خواهد بود. بررسی‌ها در مورد استفاده از انرژی بیانگر این مطلب است که میزان مصرف انرژی نه به مواد خردایش شده، بلکه فقط به زمان خردایش وابسته است.

در باب ارزیابی فنی اقتصادی استفاده از کمک سایش‌ها در مقیاس تجاری و صنعتی دو نکته را بایستی مد نظر قرار داد: (i) قیمت کمک سایش (ii) محدوده خردایش مورد نیاز (که از کمک سایش انتظار داریم). با توجه به فاکتورها و نتایج فوق‌الذکر کمک سایش‌ها فقط در محدوده بلین  $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  و بالاتر می‌تواند موثر و مفید به فایده باشد. نظر به اینکه در صنعت، محدوده بلین خردایش کلینکر سیمان و مواد خام به ندرت از  $4500 \text{ cm}^2/\text{gr}$  تجاوز می‌نماید، به نظر می‌رسد انعطاف‌پذیری فنی استفاده از کمک سایش به خصوص در خردایش کلینکر سیمان (که گچ در مقادیر مختلف استفاده

## نتایج تحقیق

سولفونیک اسید) در خردایش کلینکر (همراه با گچ) بهبود فزاینده‌ای ایجاد می‌کنند. در خردایش کلینکر سیمان پرتلند بدون گچ، افزودن از TEA اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی نرمی پودر تولید شده ایجاد می‌کنند، حتی تا آنجا که اثرش از افزودن گچ به کلینکر نسبتاً کمتر است. بنابراین در این حالت استفاده از گچ مقرون به صرفه‌تر است.

(۵) اگر مکانیزم‌هایی همچون ممانعت از به هم چسبندگی و کوتینگ زدایی از سطح گلوله و لایر را به کمک سایش‌ها نسبت دهیم، اثر بخشی این مکانیزم در کلینکر سیمان پرتلند بیشتر از سنگ آهک و در کوارتز از همه کمتر و بدون تأثیر است.

(۶) همه کمک سایش‌های به کار گرفته شده، موثر یا به عبارت دیگر سبب تغییر در طبیعت اساسی خصوصیات خردایش نشده‌اند، اگر چه آن‌ها سبب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در دامنه خردایششان شده‌اند.

(۷) همه کمک سایش‌های مورد کاربرد در خردایش کلینکر و سنگ آهک در دامنه خاصی از خردایش خیلی موثر بودند. بنابراین کاربردهای تجاری این کمک سایش‌ها جهت انجام خردایش خیلی ریزتر کلینکر و سنگ آهک ممکن است توجیه پذیر باشد.

(۱) مرحله اول خردایش سنگ آهک، کوارتز و کلینکر سیمان پرتلند در آسیای گلوله‌ای بدون استفاده از کمک سایش‌ها با سختی مقیاس موس کنترل شد. این بررسی نشان داد که نرخ خردایش برای مواد با سختی بیشتر، پایین‌ترین دامنه را به خود اختصاص می‌دهد. در مرحله دوم زمانی که نرمی مواد خردایش شده به مقدار معینی می‌رسد نیروی چسبندگی بین مواد فاکتور کنترلی محسوب می‌شود. اضافه می‌نماید که کوتینگ‌پذیری گلوله‌ها و لایر آسیا در خردایش کلینکر و سنگ آهک مشاهده شد که در کلینکر این خصوصیت نمایان‌تر است و در خردایش کوارتز این ویژگی مشاهده نشد. همچنین نشان داده شد که هر مواد خصوصیات خردایش مختص به خود را دارد و حد تقریبی بیشترین نرمی تحت شرایط خردایش مورد مطالعه قابل دستیابی است.

(۲) WSL، OA، MEG، TEA با افزایش محصول خردایش شده سنگ آهک سبب بهبود خردایش می‌شوند.

(۳) اثر کمک سایش‌های WSL، SO، MEG، TEA و آب بر روی خردایش کوارتز محدود و ناچیز ارزیابی شد.

(۴) گچ در خردایش کلینکر سیمان پرتلند به عنوان یک کمک سایش خیلی موثر عمل می‌کند. همه پنج نوع کمک سایش بررسی شده (WSL، DEG، MEG، TEA دو دسیل

