

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران



مجموعه مقالات

جلد سوم: حمل و نقل، مصالح، مدیریت ساخت

۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۷۶

دانشگاه صنعتی شریف



- ۱۱۱ ..... خصوصیات مکانیکی بتن حاوی میکرو سیلیس ایران.  
اسماعیل کنجیان، طیبه برهیزکار، ائشین طاهری، پرویز قدوسی
- ۱۲۳ ..... اثر میکروسیلیس در جمع شدگی ناشی از خشک شدن.  
علی اکبر رضانیانپور، موسی مظلوم
- ۱۳۲ ..... پژوهشی در طرح اختلاط و مشخصات مکانیکی بتن گورگردی.  
اسماعیل کنجیان
- ۱۴۰ ..... بتن بازیافتی بررسی خواص بتن ساخته شده با خرده بتن به عنوان درشت دانه.  
حسین حاجی غفاری
- ۱۵۰ ..... نقش کیفیت بتن و نوع آرماتور در کنترل خوردگی سازه های بتن مسلح.  
علی اکبر رضانیانپور، حسن بقایی
- ۱۵۹ ..... حفاظت کاتدی باروش آند قربانی شونده در جلوگیری از خوردگی فولاد در بتن.  
کمال میرطلاتی، محمود سریندی فراهانی
- ۱۶۵ ..... اثر مواد خاکی موجود در شن و ماسه بر روی مقاومت و کارآئی بتن های ساخته شده با آب اپتیمم.  
صمد دیلمتانی، حسین آذرفرین
- ۱۷۲ ..... تاب فشاری بتون ها در آب شور دریاچه ارومیه برحسب درصد جایگزینی خاکستر بادی، تغییر نوع سیمان و سن بتون ها به هنگام گذاشتن در آب  
محسن گویا، ارسطو ارمغانی، محمدرضا زارعی
- ۱۷۹ ..... تأثیر دیوکسید بتن ریژی بر مقاومت فشاری و روانی بتن در ارتباط با زمان گیرش اولیه خمیر سیمان.  
منوچهر بهرویان، سیدعلی سامع
- ۱۸۷ ..... رابطه مقاومت با وزن بتن سبک ساخته شده از لیکا.  
علیرضا خالو
- ۱۹۶ ..... بررسی مقاومت برشی مخروطی شکل بتون زیر اثر بارهای تک ضربه با انرژی افزایش یافته و ضربه های مکرر با انرژی ثابت.  
محسن گویا، ارسطو ارمغانی، اسماعیل سنگستانی سردودی
- ۲۰۵ ..... بررسی ترکهای جمع شدگی در بتن مسلح به الیاف پلی پروپیلن.  
علیرضا خالو، محمدحسین اکبری
- ۲۱۲ ..... بررسی رفتار ملات مسلح به الیاف برگ نخل.  
علیرضا خالو
- ۲۱۹ ..... نحوه سخت شوندگی آجرهای سلیکات کلسیم در فرآیند اتوکلاو.  
فرزین کلاتری، ناصر حمیدزاده

## نحوه سخت شونده‌گی آجرهای سیلیکات کلسیم در فرآیند اتوکلاو

فرزین کلاتری - استادیار

ناصر حمیدزاده - مربی

گروه عمران - دانشکده فنی - دانشگاه گیلان

### چکیده

عمل فشردن مخلوط ماسه با آهک و به دنبال آن هیدراسیون اکسید کلسیم با سیلیس تحت شرایط اتوکلاو، مصالح دانه‌ای را تبدیل به آجری سخت و مقاوم می‌سازد.

بطور متداول پارامتر سخت شونده‌گی برای مدل‌های الاستوپلاستیک مواد متخلخل بصورت تابعی از کرنشهای پلاستیک حجمی تعریف می‌شده است. قانون سخت شونده‌گی نیز صرفاً برای کلاهیک تسلیم بکار گرفته می‌شده است و پوش گسیختگی معمولاً غیر سخت شونده فرض می‌گردیده است. در حالیکه فرآیند فوق ماهیت دانه‌ای مخلوط ماسه - آهک را به یک جسم جامد تغییر می‌دهد. عبارت دیگر مصالحی را که در ابتدا، هیچگونه چسبندگی از خود نشان نمی‌داده، به جسمی جامد مبدل می‌سازد که دارای تاب کششی نیز می‌باشد.

با توجه به کیفیت و نازل بودن قیمت این نوع آجر نسبت به سایر آجرهایی که توان تولید انبوه آن در سطح گسترده وجود دارد، و با توجه به نیازهای توسعه عمرانی کشور به اینگونه مصالح، توجه پژوهشگران و صنعتگران دست اندرکار تولید این نوع آجر به برخی معایب موجود در فرآیند تولید آن مانند پدیدگی گوشه‌های آجر جلب شده است. یکی از روشها بررسی معایب آجر نهایی، تعریف جامع و کاملی از رفتار مصالح در قالب مدل‌های ریاضی می‌باشد.

در این مقاله کوشش شده است تا یک تابع تسلیم مناسب با قابلیت‌های سخت شونده‌گی مشابه مصالح مذکور تعریف گردد. تابع فوق از یک پوش همیبولیک تشکیل شده است که قابلیت سخت شونده‌گی حول یک منحنی بحرانی را دارا می‌باشد. در نهایت مدل مذکور بر اساس نتایج آزمایشگاهی تنظیم می‌گردد.

### پیشگفتار

از دیرباز این واقعیت کاملاً شناخته شده است که اگر هیدرات آهک و سیلیکات با هم ترکیب و سپس کوبیده شوند و بعد تحت فشار بخار آب و دمای زیاد قرار گیرند، محصول آن جسمی سنگین و مقاوم خواهد بود که برای مصارف ساختمانی مناسب است. این جسم سنگین آجر سیلیکات کلسیم نامیده می‌شود.

در بدو پیدایش، این نوع آجر را آجرهای ماسه آهکی نیز می‌نامیدند و در حال حاضر نیز چنانچه با ماسه طبیعی ساخته شود همانند سابق به همین نام خوانده می‌شود.

آجرهای سیلیکات کلسیم از بیم آمیخته مقدار کمی آهک با ماسه و یا سنگ خرد شده که دارای مقادیر زیادی سیلیس باشد ساخته می‌شود. مواد یاد شده با آب به هم آمیخته شده و در قالب ریخته می‌شوند و بوسیله پرس‌های مکانیکی و یا فیدروپیک تحت فشار زیاد قرار می‌گیرند تا به شکل دلخواه درآیند. آجرهای خام بدست آمده چند ساعت در دستگاهی بنام اتوکلاو (Autoclave) تحت فشار بخار آب و دمای زیاد قرار می‌گیرند تا پخته و سخت شوند. عمل سخت شدن بستگی



به فعل و انفعالات شیمیایی آهک شکفته با سطوح سیلیسی ماسه یا سنگ خرد شده دارد و حاصل فعل و انفعالات فوق هیدرات سیلیکات کلسیم است. [۱ و ۲ و ۳]

البته در این میان آنچه که تعیین می‌کند مخلوط چگونه می‌تواند بطور موثری متراکم و تثبیت گردد، توزیع ابعاد دانه‌ها، یا دانه بندی خاک است. زیرا نسبت خلاء نهائی علاوه بر خلوص آهک و کیفیت ماسه، تاثیر فراوانی بر مقاومت و سختی محصول دارد. بدین ترتیب استقبال شایان از این نوع آجر نه تنها بدلیل فراوانی مصالح اولیه، بلکه به دلایل ارزانی نسبی و توان تولید انبوه که با تاسیس چندین کارخانه در سراسر کشور انجام پذیرفته، توجه به خواص و رفتار این مصالح رو به فزونی گذاشته است. در این مقاله کوشش شده است تا رفتار مصالح یادشده در قالب مدل سازی ریاضی بررسی و مطالعه گردد. به ویژه تابع تسلیم مناسبی با توان ارائه شیوه سخت شونده گی ماده، پیشنهاد شده است که با کمک مطالعات آزمایشگاهی پارامترها و ضرایب این تابع تعریف خواهد شد.

آنچه بدنبال خواهد آمد نخست گزارش مختصری از آزمایشات مقاومت برشی بر روی مصالح مزبور، و بررسی اثر عوامل مختلف بر آن است. سپس مدل پیشنهادی ارائه می‌شود و در پایان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ضرایب مدل ارزیابی می‌گردد.

### نتایج مطالعات آزمایشگاهی

نخست مقاومت برشی ماسه - آهک عمل نیامده در دستگاه برش مستقیم اندازه گیری شد و زاویه اصطحاک داخلی ( $\varphi$ ) تقریباً برابر  $30^\circ$  بدست آمد. البته با توجه به ضرایب یکنواختی  $C_{II} = 1/5$  و ضریب انحنای  $C_{II} = 1$  و مشخصات عمومی منحنی دانه بندی که یکنواختی مصالح را بیان می‌داشت، فرض گردید که ماسه ریخته شده بصورت طبیعی دارای تراکم نسبی حداکثر بوده و زاویه  $\varphi$  آن تغییر چشمگیری در حالات مختلف از خود نشان نمی‌دهد.

سپس تعدادی آزمونه استوانه‌ای شکل در ابعاد  $(4 \times 2)$  ساخته و در دستگاه اتوکلاو کارخانه آجر البرز شهرستان رشت در فشار بخار آب  $15$  اتمسفر بعمل آمد و آنگاه بصورت بارگذاری تک محوری، مقاومت فشاری آنها اندازه گیری گردید. تأثیر عوامل مختلف همچون درصد آهک، فشار تراکم و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری مورد مطالعه قرار گرفت. آزمونه‌ها در پنج دسته درصد آهک مختلف  $(2\% و 8\% و 12\% و 16\% و 20\%)$  و دسته‌های هر در صد آهک در چهار فشار تراکم مختلف  $(\frac{kg}{cm^2})$   $450$  و  $550$  و  $650$  و  $700$  ساخته شدند. نمونه‌های فوق در مدت  $5$  ساعت بعمل آمدند ولی تعداد دیگری نمونه با درصد آهکهای مختلف که در فشار  $550 \frac{kg}{cm^2}$  ساخته شده بودند در زمانهای دیگر بعمل آمدند.

در هر حالت دو آزمونه جهت میانگین‌گیری ساخته شد که مجموعاً برای این بخش  $72$  آزمونه ساخته و آزمایش گردید. ضمناً سه آزمونه در دستگاه سه محوری سنگ آزمایشگاه زمین شناسی دانشگاه تربیت مدرس آزمایش گردید.

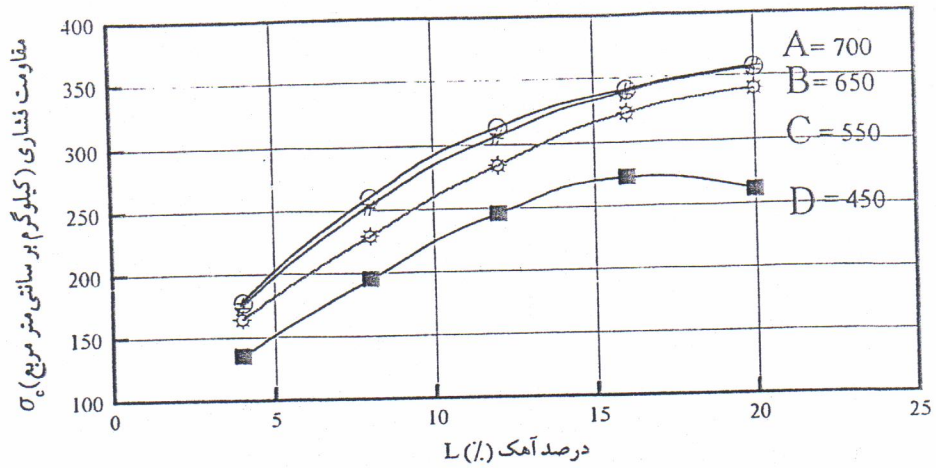
### تأثیر میزان آهک بر مقاومت فشاری

درصد آهک موجود در مخلوط تأثیر عمده‌ای بر روی تشکیل پیوند بین دانه‌ها و در نهایت بر روی مقاومت فشاری آجرها دارد. بمنظور ارزیابی کمی این تأثیر نمونه‌هایی با درصد آهکهای مختلف و تحت فشار تراکم مختلف ساخته شد که نتایج مقاومت فشاری آنها در نمودار شماره ۱ ارائه گشته است.

بغیر از منحنی D سایر منحنی‌ها افزایش مقاومت فشاری را با آهنگی کاهنده نسبت به افزایش درصد آهک نشان می‌دهند. حداکثر مقاومت فشاری مشاهده شده در منحنی D تقریباً در  $17\%$  آهک بوده و افزایش بیشتر آهک به ظاهر موجب کاهش مقاومت می‌گردد. ولی این پدیده در سه منحنی دیگر در طیف در صد آهک آزمون شده دیده نشد. مع هذا بطور یقین می‌توان دریافت که برای فشار تراکم‌های مختلف در صد آهک بهینه‌ای می‌بایست وجود داشته باشد که آهک افزون بر آن نه تنها باعث افزایش پیوند بین دانه‌ها نمی‌گردد بلکه بعنوان یک مصالح پرکننده ضعیفتر عمل می‌نماید. البته با توجه به اینکه بطور متداول درصد آهک استفاده شده در عمل هیچگاه از  $20\%$  افزون نمی‌گردد از اینرو بررسی فرضیه فوق بی اهمیت به نظر می‌رسد.





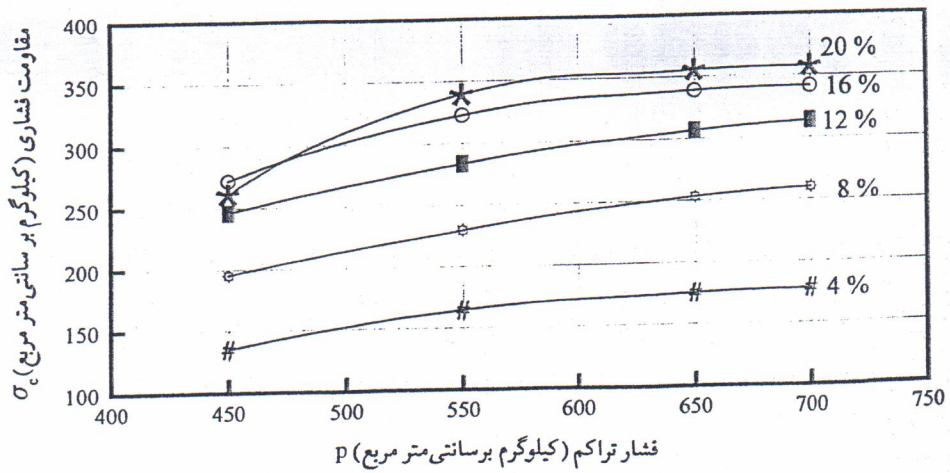


نمودار ۱- تأثیر درصد آهک روی مقاومت فشاری

### تأثیر فشار تراکم بر مقاومت فشاری

یکی دیگر از عواملی که پیش بینی می‌شد تأثیر به سزایی بر مقاومت محصول نهایی داشته باشد فشار تراکمی بود که در موقع ساخت به آجر وارد می‌آید.

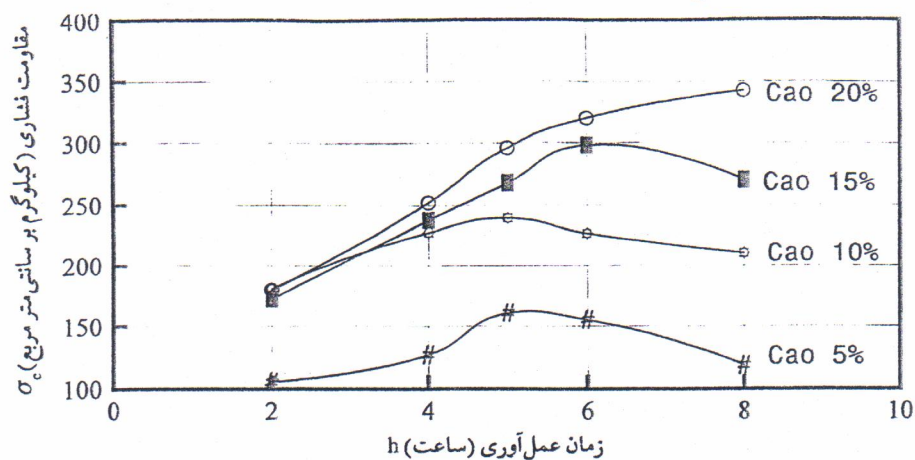
فشار تراکمی شهوداً رابطه مستقیم با تراکم نسبی دارد که آن نیز به نوبه خود رابطه‌ای مستقیم با مقاومت اصطحکاکی مصالح دارد. نمودار شماره ۲ روند افزایش مقاومت فشاری محصور نشده را نسبت به فشار تراکمی برای درصد آهکهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود نرخ افزایش مقاومت فشاری با افزایش فشار تراکم کاهش می‌یابد و بنظر می‌رسد فشار تراکم افزون بر  $700 \frac{kg}{cm^2}$  تأثیر عمده‌ای بر مقاومت نداشته باشد.



نمودار ۲- تأثیر فشار تراکم روی مقاومت فشاری

### تأثیر زمان عمل آوری بر روی مقاومت فشاری

نمونه‌های یاد شده همگی در مدت ۵ ساعت (زمان استاندارد) عمل آوری شده بودند، ولی به منظور ارزیابی اثر زمان عمل آوری تعدادی نمونه با درصد آهکهای مختلف ولی تحت فشار تراکمی ثابت  $550 \frac{kg}{cm^2}$  در زمانهای (۲ و ۴ و ۸) ساعت عمل آوری شدند. نتایج زمان عمل آوری بر روی مقاومت فشار در نمودار شماره ۳ ارائه شده است.



نمودار ۳- تأثیر زمان عمل آوری روی مقاومت فشاری

### مدل مشخصه پیشنهادی

بمنظور ایجاد توانائی پیش بینی رفتار مصالح تحت بارگذاریهای مختلف، نیاز است نخست در قالب مدل سازی ریاضی رفتار کشسانی و خمیری مصالح تعریف گردد و سپس این مدل در چهار چوب نتایج آزمایشگاهی سنجش و تنظیم گردد. در ارتباط با رفتار غیرکشسان مصالح، اولین قدم در جهت ارائه یک مدل ریاضی تعریف یک تابع تسلیم و شیوه سخت شوندگی آن است.

عموماً تسلیم مصالح غیر متخلخل مانند فلزات وابستگی به تنشهای همه جانبه  $\sigma_m$  ندارد. در حالیکه گسیختگی مصالح دانه‌ای و یا متخلخل بطور مشخص بستگی به این نامتغیر تنشی دارد. [۴]  
مقاومت برشی مصالح متخلخل با افزایش فشار همه جانبه افزایش می‌یابد ولی آزمایشهای متنوع بر روی خاک، بتن، سنگ و سایر مواد متخلخل نشان داده است که این افزایش خطی نبود، [۵ و ۷] و بلکه آهنگ افزایش مقاومت برشی با فشار همه جانبه کاهش می‌یابد تا آنجا که افزایش فشار همه جانبه هیچگونه افزایش مقاومت برشی را بدنبال ندارد. بعبارت دیگر پوش گسیختگی بصورت هذلولی (هیپربولیک) است. [۸] علت این پدیده نیز ناشی از این اصل است که وقتی فشار همه جانبه به سمت بی نهایت میل می‌کند، مقاومت برشی در اصل نمی‌تواند به بی نهایت میل نماید و ماهیت مقاومت برشی از حالت اصطحاکاکی خارج شده و به پیوند بین ذرات و بلورها تبدیل می‌گردد. به واقع با کاهش تخلخل و احیاناً ایجاد و افزایش چسبندگی، معیار تسلیم مواد دانه‌ای و متخلخل می‌بایست به سمت معیار مواد غیر متخلخل میل کند. [۹] با توجه به توضیحات فوق بنظر می‌رسد که روند کاهش وابستگی برشی به فشار همه جانبه را در مقادیر بسیار بالا بتوان با یک تابع تانژانت هیپربولیک مدل نمود.

در این بخش تابع مورد نظر معرفی می‌گردد و سپس تاثیر عواملی همچون فشار تراکم و درصد آهک بر پوش گسیختگی و یا به تعبیری بر سخت شوندگی مصالح بررسی می‌شود.

### تابع هیپربولیک

شرایط عمومی گسیختگی مصالح یاد شده را تابعی به صورت زیر می تواند ارضا نماید.

$$F_f = \sigma - \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \tanh [a (\sigma_m + b)] = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_m$  -  $\sigma$  به ترتیب نامتغیرهای تنشهای همه جانبه و انحرافی و بشرح زیر هستند

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{6} [ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 ] \right\}^{1/2}$$

$\sigma_y$  مقاومت کششی ماده کاملاً متراکم است،

و  $a$  و  $b$  ثوابتی هستند که به شیب و محل تقاطع پوش با محور  $\sigma_m$  مربوط می شود.

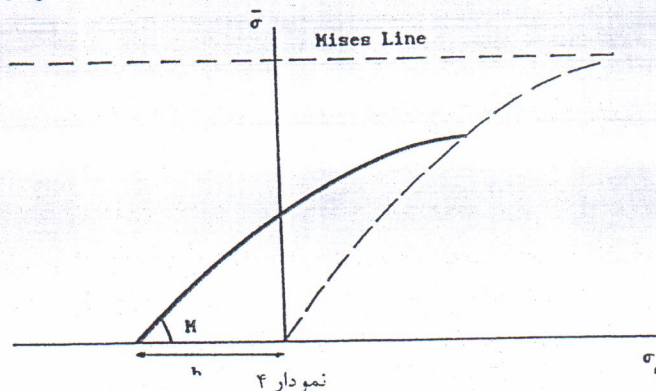
برای تعیین ضریب  $a$  نرخ تغییرات تنش انحرافی نسبت به تنش متوسط محاسبه می شود.

$$\frac{d(\sigma)}{d(\sigma_m)} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} a \operatorname{sech}^2 [a (\sigma_m + b)] \quad (2)$$

یا

$$= \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} a \left[ \frac{2}{e^{2a(\sigma_m + b)} + e^{-2a(\sigma_m + b)}} \right]^2 \quad (3)$$

بامشخص نمودن شیب اولیه منحنی [یعنی شیب در  $\sigma_m + b = 0$ ] با حرف  $M$  معادله فوق را می توان بصورت زیر نوشت.



$$M = a \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

بنابراین ضریب  $a$  بر حسب شیب اولیه پوش قابل تعریف است

$$a = \frac{\sqrt{3} M}{\sigma_y} \quad (5)$$

پیش از وارد کردن هرگونه فشار تراکمی و قبل از فرصت برای عمل آمدن آهک، مصالح ماسه آهکی هیچ گونه چسبندگی و به هم پیوستگی از خود نشان نمی دهد از اینرو و منحنی پوش گسیختگی از مبدأ مختصات یعنی  $\sigma_m = 0$  عبور خواهد کرد. در این حالت  $b = 0$  است و این منحنی پوش گسیختگی مبنا نامیده می شود.

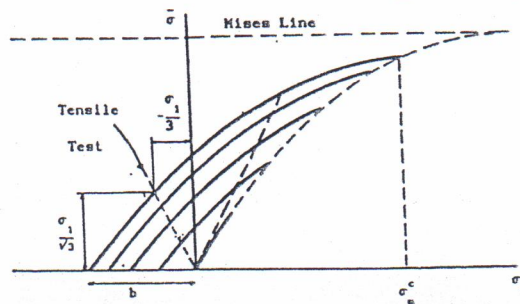
در صورت تطابق با مدلهای حد بحرانی مشخص می شود که شیب اولیه پوش مبنا رابطه ای با زاویه اصطحاک داخلی  $\varphi$  به صورت زیر دارد.

$$M_0 = \frac{2 \sqrt{3} \sin \varphi}{3 \pm \sin \varphi} \quad (6)$$

که علامت  $\pm$  در مخرج مشخص کننده شیب منحنی گسیختگی در کشش و یا فشار است، ضریب  $b$  نیز ملاک و معیار افزایش انسجام و چسبندگی مصالح میباشد. با افزایش چسبندگی و تقویت پیوند بین دانه ها محل تلاقی پوش گسیختگی و



محور  $\sigma_m$  به بخش منفی (کشش همه جانبه) انتقال پیدا می کند.  
 ولی با توجه به اینکه امکان آزمایش کشش سه محوری وجود ندارد می توان مقدار ضریب "b" را بصورت غیر مستقیم و از روابط زیر و با استفاده از نتایج آزمایشهای فشاری بدست می آید.  
 تحت شرایط آزمایش فشاری تک محوری محصور نشده (یعنی  $\sigma_1 \neq 0$  و  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) مسیر تنش در فضای  $\sigma - \sigma_m$  خطی را با شیب  $1:\sqrt{3}$  دنبال می کند تا هنگامیکه تنش اصلی  $\sigma_1$  به اندازه مقاومت فشاری  $\sigma_c$  گردد یعنی در حین گسیختگی  $\sigma_m = \frac{\sigma_c}{3}$  و  $\sigma = \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}}$  (نمودار ۵)



نمودار ۵

$$\frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \tanh \left[ \frac{\sqrt{3} M}{\sigma_y} \left( \frac{\sigma_c}{3} + b \right) \right] \quad (7)$$

از رابطه فوق مقدار b بر حسب  $\sigma_c$  قابل استخراج است

$$b = \frac{\sigma_y}{2\sqrt{3} M} \ln \left[ \frac{1 + \sigma_c/\sigma_y}{1 - \sigma_c/\sigma_y} \right] \quad (8)$$

از اینرو کافیت رابطه ای برای مقاومت فشاری بر حسب عواملی که بر سختی مصالح تأثیر دارد پیدا شود تا تابع گسیختگی سخت شونده کاملاً تعریف گردد. تابع گسیختگی ارائه شده می تواند بصورت پلی بین پوش گسیختگی مواد دانه ای و سطح تسلیم برای مصالح غیر متخلخل عمل نماید، زیرا نخست در فشارهای همه جانبه کم بمانند پوش خطی مورکولمب عمل می کند و سپس بدنبال حصول چسبندگی و در فشارهای بالا به سمت تابع فون میزس میل می کند.

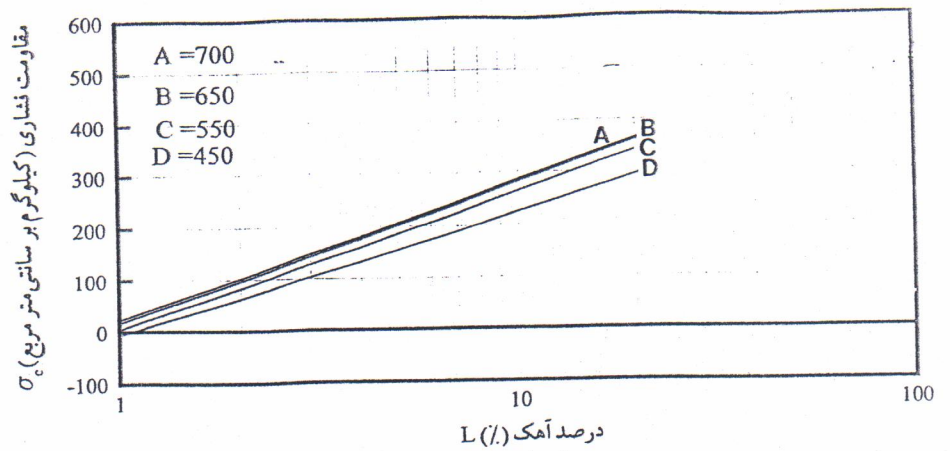
$$\lim \sigma_m \rightarrow \infty \quad F_f \sim \sqrt{3} \sigma - \sigma_y \quad (9)$$

نحوه تعیین پارامتر سخت شونده

همانگونه که مشاهده گردید، ضریب "b" بوسیله مقاومت فشاری قابل تعریف می باشد، از اینرو چنانچه روابطی برای مقاومت فشاری  $\sigma_c$  بر حسب عوامل مؤثر بر آن پیدا شود، شیوه سخت شونده مصالح بطور کامل تعریف می گردد. از آزمایشهای بعمل آمده بنظر می رسد که در فضای نیمه لگاریتمی  $\sigma_c - \log L$  که L در آن نمایانگر درصد آهک است، خطوط راست مناسبی می تواند تقریباً تأثیر مقدار آهک را بر روی مقاومت فشاری آجر شبیه سازی نماید. (نمودار ۶)  
 شایان ذکر است که تأثیر منحنی D به جهت افت مقاومت فشاری در درصد آهک بیشتر از ۱۶٪ فقط تا این حد وارد معادلات گردیده است. با برآزش معادله خط بر خطوط فوق می توان رابطه ای بصورت زیر بدست آورد

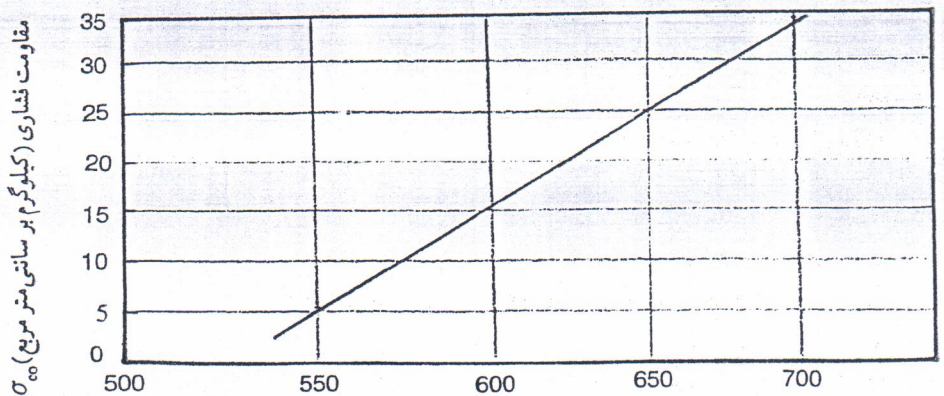
$$\sigma_c = \sigma_{c0} + S \log L \quad (10)$$

که در آن  $\sigma_{c0}$  مقادیر مقاومت فشاری هر خط در یک درصد آهک مینا است (مثلاً ۱٪) که بوسیله بیرون یابی پیدا می شود. و S نیز شیب خطوط فوق در فضای نیمه لگاریتمی یا آهنگ افزایش مقاومت فشاری نسبت به درصد آهک است.



نمودار ۶- تأثیر درصد آهک روی مقاومت فشاری

با توجه به تغییرات  $\sigma_{co}$  نسبت فشار تراکمی که مجدداً در فضای نیمه لگاریتمی  $\sigma_{co} - \log P$  که در آن فشار تراکمی است خطی می باشد (نمودار ۷)، لذا



فشار تراکم (کیلوگرم بر سانتی متر مربع) P

نمودار ۷- تأثیر فشار تراکم روی مقاومت فشاری برای ۱٪ آهک

$$\sigma_{co} = Q + R \log P \quad (11)$$

که از روی نمودار مقادیر R و Q به ترتیب ۲۷۷ و -۷۵۶ پیدا شده است از طرف دیگر تغییرات شیب خطوط نمودار ۶ نسبت به فشار تراکمی نیز بصورت رابطه زیر قابل تعریف است

$$S = S_0 + K \log P \quad (12)$$

که مقادیر  $S_0$  و K به ترتیب ۱۰۸ و ۵۳ بدست آمد.

ز اینرو معادله نهایی مقاومت فشاری بر حسب درصد آهک و فشار تراکم بصورت زیر قابل ارائه است.

$$\sigma_c = (108 + 53 \log P) \log L + 277 \log P - 756 \quad (13)$$

بعنوان مثال اگر  $P=550$  و  $L=1\%$  باشد،  $\sigma_c=232$  می شود که با مقاومت فشاری اندازه گیری شده کمتر از ۱٪ تفاوت دارد.



1. W.H. Taylor , D.R.Moorehead & W.F.Cole  
 High Strength Calcium Silicate Hydrate  
 Division of Building Research,  
 International Research Organisation, Melbourne, Australia 1975.
2. G.E.Bessey  
 Calcium Silicate Bricks (including sand-lime and flint-lime bricks)  
 Overseas Building Notes No 154 Feb.1974 .
3. H.F.W.Taylor  
 A Review of Autoclaved Calcium Silicates  
 Dept. of Chemistry, The University of Aberdeen 1975.
4. P.V.Lade  
 Effect of Voids and Volume Changes on The Behaviour of Frictional Materials  
 Int.J.Analy.Math.Geomech.Vol 12 pp.351-370 1988 .
5. P.V.Lade  
 Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil With Curved Yield Surface  
 Int.J.Solids Struct.Vol 13 pp.1019-1035 1977 .
6. S.Shima & K.Mimara  
 Densification Behaviour of Ceramic Powders  
 Int.J.Mech.ASME.Vol. 28 No.1 pp.53-59 1986.
7. V.A.Iverson  
 Densification of Metal Powders  
 Eric Renner NewYork 1978 .
8. F.Kalantary  
 Constitutive Modelling of Compaction of Industrial Powders  
 Department of Civil Engineering, University of Swansea, August 1992.
- 9 . G.N.Pande & F.Kalantary  
 Constitutive Modelling of Isostatic Pressing of Metallic Powders  
 4th. Int. Conf. on HIP, Stoke-on-Trent, England Nov.1990