

# راهنمای تزریق در سازه‌های آبی

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه - وزارت نیرو

# راهنمای تزریق در سازه‌های آبی

نشریه شماره ۱۸۶

معاونت امور فنی  
دفتر امور فنی و تدوین معیارها

## فهرستبرگه

سازمان برنامه و بودجه. دفتر امور فنی و تدوین معیارها  
راهنمای تزریق در سازه‌های آبی / سازمان برنامه و بودجه، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و  
تدوین معیارها؛ وزارت نیرو، [طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور].- تهران: سازمان  
برنامه و بودجه، مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات، ۱۳۷۸.  
۴۷ ص: مصور، جدول، نمودار.- (سازمان برنامه و بودجه. دفتر امور فنی و تدوین معیارها؛  
نشریه شماره ۱۸۶)

ISBN 964-425-162-8

فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیبا.  
کتابنامه: ص. ۴۷.

۱. دوغاب‌زنی. ۲. سازه‌های هیدرولیکی - طرح و محاسبه - استانداردها. ۳. مهندسی  
رودخانه - استانداردها. الف. ایران. وزارت نیرو. طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور.  
ب. سازمان برنامه و بودجه. مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات. ج. عنوان.

۶۲۴/۱۵۱

TA ۱۴۶/س ۲و۲

[TA ۳۶۸]

۷۸-۱۷۱۹۵م

کتابخانه ملی ایران

ISBN 964-425-162-8

شابک ۹۶۴-۴۲۵-۱۶۲-۸

راهنمای تزریق در سازه‌های آبی

تهیه کننده: معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها

ناشر: سازمان برنامه و بودجه. مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات

چاپ اول: ۵۰۰ نسخه، ۱۳۷۸

قیمت: ۳۵۰۰ ریال

چاپ و صحافی: موسسه زحل چاپ

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.



## پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان سنجی) مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرحهای عمرانی بلحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرحها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیتی ویژه برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرحهای عمرانی کشور (مصوبه مورخ ۱۳۷۵/۳/۲۳ هیأت محترم وزیران) بکارگیری از معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام‌شده طرحها را مورد تأکید جدی قرار داده است. با توجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان برنامه و بودجه (دفتر امور فنی و تدوین معیارها) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها.
- پرهیز از دوباره‌کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبرتهیه‌کننده استاندارد

ضمن تشکر از اساتید محترم دانشگاه صنعتی اصفهان برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش نموده و صاحب‌نظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

دفتر امور فنی و تدوین معیارها

پاییز ۱۳۷۸

## ترکیب اعضای کمیته

نام اعضای کمیته تخصصی زمین‌شناسی مهندسی طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور که در تهیه این استاندارد مشارکت داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر است:

خانم فیروزه امامی	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	لیسانس زمین‌شناسی
آقای رسول بنی‌هاشمی	شرکت مهندسین مشاور مهاب‌قدس	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای فریدون بهرامی سامانی	شرکت مهندسین مشاور تماوان	فوق لیسانس زمین‌شناسی مهندسی
آقای عباس رادمان	سازمان مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسن عباسی	کارشناس آزاد	لیسانس زمین‌شناسی
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسین معماریان	دانشگاه تهران	دکترای زمین‌شناسی مهندسی
آقای عبدالرزاق واثقی	وزارت نفت	فوق لیسانس مدیریت

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	۱- مقدمه
۲	۲- خواص خاک و سنگ
۳	۱-۲ اکتشاف ساختگاه
۴	۲-۲ زمین شناسی ساختگاه
۴	۳-۲ تراوش آب زیرزمینی و تراوایی پی
۵	۴-۲ اندازه گیری تراوایی سنگ در صحرا
۵	۳- مواد معلق، محلولها و رزینهای تزریق
۷	۱-۳ دوغابها
۱۱	۲-۳ مواد مورد استفاده در دوغاب
۲۰	۳-۳ خواص دوغابهای تزریق
۲۷	۴-۳ خواص فیزیکی دوغابهای تزریق شده
۳۸	۵-۳ محلولها و رزینها
۴۷	۴- منابع و مآخذ

نظر به اینکه تزریق دوغاب سیمان کاربرد بسیاری در مهندسی آب به ویژه سدسازی دارد و مطالب زیادی در این مورد به زبان فارسی منتشر نشده است، کمیته زمین‌شناسی مهندسی طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب تصمیم گرفت، برای اینکه هرچه سریعتر این مطالب در دسترس استفاده‌کنندگان قرار گیرد، استاندارد اصول و مبانی تزریق در سازه‌های آبی را منتشر کند. در این استاندارد منظور از تزریق دوغاب، روشی است که با آن در روزنه‌های خاک، گسستگیها و حفره‌های توده‌های سنگی، دوغاب تزریق می‌شود به ترتیبی که مقاومت فیزیکی و مکانیکی آنها را افزایش دهد. برای دستیابی به هدف موردنظر، گمانه‌هایی حفر می‌شود و از طریق آنها دوغاب تحت فشار به درون زمین (خاک یا سنگ) تزریق می‌شود تا خلل و فرج خاک یا سنگ اطراف گمانه پر شود و شرایط مطلوب حاصل شود.

تزریق دوغاب کاربرد وسیعی دارد و شامل موارد زیر است :

- کاهش نفوذپذیری پی سازه‌های آبی برای کنترل نشت و جلوگیری از هدررفتن آب ذخیره شده
- کاهش فشار برکنش<sup>۱</sup> (بالا بر) مؤثر بر سازه
- جلوگیری از بروز پدیده رگاب<sup>۲</sup> و فرسایش پی
- افزایش مقاومت پی سازه‌های سنگین و کاهش دگرشکلی آن (کاهش نشست پی)
- اتصال اجزای ساختمانی مجزا و تبدیل آن به ساختار همگن با تزریق دوغاب در بین درزهای آنها، مانند سدهای بتنی وزنی و قوسی
- تثبیت کابلهای مسلح در سازه‌های بتنی پیش ساخته و پیش تنیده
- تثبیت مهاری‌های پیش تنیده در سنگ
- پرکردن حفره‌های بین سنگ و پوشش تونل که موسوم به تزریق همبری<sup>۳</sup> است.
- احیاء و ترمیم ابنیه معیوب<sup>۴</sup> در ساختمانهای قدیمی و یادمانها
- ساختن بتن در زیرآب و یا پر کردن فضاهاى خالی بسیار بزرگ (مانند کارستهای بزرگ) با تزریق دوغاب در شنی که از قبل ریخته شده است<sup>۵</sup>.

انتخاب نوع یا مخلوط مناسب، به هدف تزریق، خواص مواد تزریق شونده و محیط مورد تزریق بستگی دارد و از دوغاب رقیق تا غلیظ، ملات سیمان و پرکننده‌ها<sup>۶</sup> تا محلول کلوییدی و شیمیایی و رزین (برای تزریق دوغاب در حفره‌هاى موادی که تخلخل ریز دارند) تغییر می‌کند. دوغاب با فشار در طول معینی از گمانه، تزریق می‌شود تا حجم

1 - Uplift

2 - Piping

3 - Contact grouting

4 - Defective masonry

5 - Prepack

6 - Fillers



مورد نظر اطراف گمانه را پر کند یا به فشار ویژه بیشینه قسمتی از گمانه، و یا به جریان کمینه ویژه دوغاب که به معیار اشباع موسوم است برسد. در جریان کار، زهاب دوغاب تزریقی از آن جدا می شود و توده متراکم مخلوط تزریق، گسستگیها و حفره‌ها را پر می کند.

## ۲- خواص خاک و سنگ

خاکها، رسوباتی سست و از نظر زمین شناسی جوان هستند و تحت فشاری که بستگی به وزن مواد روباره یا پیش تنیدگی و بالاخره چسبندگی خاک دارد، به هم پیوسته اند. تخلخل خاکها بین ۱۵ تا ۵۰ درصد متغیر است و ابعاد حفره‌های آنها به حجم نسبی و اندازه کوچکترین دانه‌ها در مخلوط و بیشینه تنشی که از زمان رسوبگذاری بر آنها اعمال شده است، بستگی دارد. تخلخل و اندازه حفره‌ها بر تراوایی محیط مؤثرند.

سنگها مواد جامدی هستند که اجزای اصلی آنها به وسیله تبلور و نیروهای بین دانه‌ای به هم پیوسته اند و عملاً مستقل از وضعیت تنش محلی اند. تخلخل آنها معمولاً کم است و عموماً بین ۱ تا ۱۰ درصد تغییر می کند. سنگها عموماً توده‌های کم یا بیش همگن هستند. از آنجا که حفره‌ها اولیه سنگهای بکر مجزاست و شبکه مسیرهای مرتبط که سیال بتواند عبور کند وجود ندارد تراوایی آنها معمولاً قابل اغماض است.

تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی در سنگها، چین خوردگی و شکستگی ایجاد و سبب شکاف و درز داری سنگ می شود. گسستگیهای سنگ که ناشی از صفحات لایه بندی، درز و شکافها هستند، ممکن است بسته و یا باز باشند و یا اینکه با خرده سنگها و یا رسوبات که در دوره‌های جدیدتر زمین شناسی به داخل آنها انتقال یافته است، پر شده باشند. این گسستگیها سبب افزایش تراوایی توده سنگ می شوند.

در داخل هر یک از این دو گروه سنگ و خاک که از دیدگاه تزریق دوغاب خواص اساسی متفاوتی دارند، موادی با چگالی، مقاومت و تغییر شکل پذیری متفاوت یافت می شود. اختلاف اصلی بین این دو گروه، تخلخل مصالح و روشی است که آب و دوغاب از داخل آنها تحت فشار عبور می کند.

شناخت خواص خاک و سنگ به منظور طراحی و اجرای عملیات تزریق دوغاب به گونه‌ای که در هر مورد روشها و مواد مناسب در نظر گرفته شود، مستلزم اکتشافات و تحقیقات جامع است. کارهای انجام شده در مورد شرایط زمین شناسی و مواد مشابه، راهنمای با ارزشی برای برنامه ریزی کارهای اکتشافی و ارزیابی بهتر نتایج است. پارامتر

اساسی برای محاسبه میدان هم‌پتانسیل که در زمان آب‌اندازی در پی سدها به وجود می‌آید و همچنین برای طراحی پرده تزریق<sup>۱</sup> که بتواند از اتلاف آب از زیر پی و آثار منفی آب بر مواد داخل پی جلوگیری کند، تراوایی سازند است.

تراوایی سازند سنگی که در آن آب از درون درز و شکافها با عرض و طول متغیر جریان دارد، بر حسب واحد لوژون<sup>۲</sup> بیان می‌شود.

تراوایی ذاتی خاک دانه‌ای را معمولاً بر حسب ضریب داری و تراوایی کلی را بر حسب سانتیمتر بر ثانیه بیان می‌کنند.

## ۱-۲ اکتشاف ساختگاه

نوع و مقدار کارهای اکتشافی برای پروژه تزریق باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که ضمن انتخاب مناسب‌ترین محل، اطلاعات موردنیاز برای طراحی یک سازه مطمئن نیز به دست آید.

اکتشاف ساختگاه شامل موارد زیر است :

- تهیه نقشه زمین‌شناسی، مطالعات چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی پی، بررسی ساختارهای زمین‌شناسی و تحلیل فرآیندهای تکتونیک
- بررسیهای ژئوفیزیک به منظور تأمین اطلاعات کلی درباره مقاومت الکتریک و سرعت انتشار امواج لرزه‌ای
- حفر ترانشه و گالری به منظور مطالعه مستقیم نوع و ترکیب مواد، توالی طبقات و سنگ‌شناسی آنها
- حفر گمانه‌های اکتشافی و تهیه مغزه‌های لازم برای مطالعات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی طبقات عمیق و ارتباط تکتونیک آنها
- آزمایش بر جای تغییر شکل‌پذیری و تراوایی پی
- آزمایش تزریق آزمایشی در محل پی سازه

---

1- Grout curtain

۲- یک واحد لوژون، عبارت از تراوایی سنگی است که از یک متر طول گمانه آزمایشی تحت فشار ۱۰ بار، یک لیتر بر دقیقه آب عبور کند (برای آگاهی بیشتر درباره آزمایش لوژون به استاندارد شماره ۱۵۵-الف طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور رجوع کنید).

وقتی که تزریق دوغاب موردنظر باشد، برنامه اکتشاف ساختگاه باید اطلاعاتی را که مورد نیاز طراحی تزریق است، فراهم کند. از جمله این اطلاعات می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بررسی و اکتشاف سیستم گسستگیهای پی، مانند: صفحات لایه بندی، درز و شکاف، فاصله داری و مواد پرکننده گسستگیها
- مطالعه چاهها، چشمه ها و رودخانه های زیرزمینی منطقه و ظرفیت آنها
- بررسی و مطالعه شرایط آب زیرزمینی و مشخصات سطح ایستابی از جمله شیب هیدرولیکی و عمق سطح ایستابی
- تعیین دقیق ضریب تراوایی زمین ساختگاه با آزمایش آب تحت فشار<sup>۱</sup>

## ۲-۲ زمین شناسی ساختگاه

چگونگی آبنندی پی زیر سد و سایر جنبه های تزریق با توجه به ویژگیهای زمین شناختی، زمین ساختی و مشخصات فیزیکی ساختگاه تعیین می شود. با مقایسه نتایج و تجارب حاصل از پروژه های انجام شده در سایر محلها در شرایط زمین ساختی مشابه، می توان مناطق مسئله دار را پیش بینی کرد و آن را راهنمای برنامه ریزی کارهای اکتشافی قرار داد.

## ۳-۲ تراوش آب زیرزمینی و تراوایی پی

حل معادله لاپلاس مربوط به جریان آب در محیط متخلخل با شرایط حدی معین، پایه ای برای محاسبه ارتفاع نظیر فشار آب نشستی در مواد و شرایط مختلف است. مدل های فیزیکی مثل: مدل های هیدرولیک، الکتریک و مایعات گرانی و نیز مدل های عددی (اجزای محدود<sup>۲</sup> و اجزای مرزی<sup>۳</sup>) بر اساس معادله لاپلاس طراحی شده اند. با فرض اینکه حرکت آب در فضاها ی خالی، آرام و بر اساس قانون داریسی باشد خواهیم داشت:

$$V = Ki \quad (1)$$

که در آن  $V$  سرعت متوسط جریان بر حسب متر بر ثانیه،  $K$  ضریب تراوایی بر حسب متر بر ثانیه و  $i$  گرادیان فشار است.

معادله دیفرانسیل مرتبه دوم لاپلاس به صورت زیر است :

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

که در آن ضریب تراوایی در امتدادهای  $x, y, z$  و ارتفاع پتانسیل است. با در نظر گرفتن شرایط حدی، با حل معادله فوق، دو دسته منحنیهای خطوط هم پتانسیل ثابت  $\Phi = \Phi(x, y, z)$  و خطوط جریان  $\psi = \psi(x, y, z)$  به دست می آید.

گرچه مدل محیط متخلخل که برای سنگ شکاف دار به کار می رود، تقریب اولیه ای از شرایط واقعی است، با وجود این، برای مطالعه تراوش از درون سنگ جالب توجه است؛ زیرا کاربرد مدل‌های ریاضی ساده، منجر به شبیه سازی تقریبی توزیع فضایی و واقعی ارتفاع پتانسیل و گرادیان فشار در محل‌های بحرانی و حجم جریان نشی می شود. اساساً سنگ درز و شکافدار با محیط متخلخل تفاوت دارد و تراوایی سیستم‌های صفحات لایه بندی، درزها و شکافها به مراتب بیشتر از تراوایی جسم سنگی بین آنها است. بنابراین با دقت کافی می توان فرض کرد که آب فقط از گسستگیها تراوش می کند.

عوامل موثر بر جریان آب از میان شکافها عبارتند از: جهت و وضعیت گسستگیها، فاصله داری، تراکم، بازشدگی درزها، زبری و شکل دیواره درزها و تراوایی خاک بین درزها

جهت و وضعیت درزها با شیب و امتداد آنها تعیین می شود. فاصله شکافها و درجه درزداری از طریق آماري با اندازه گیری فاصله داری و بازشدگی آنها در دسته درزهای مختلف انجام می گیرد.

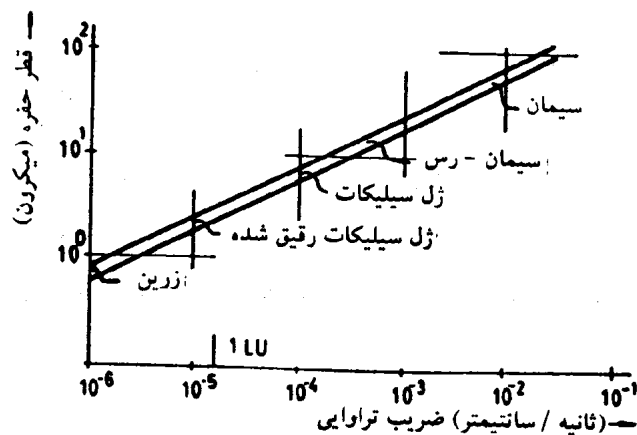
## ۴-۲ اندازه گیری تراوایی سنگ در صحرا

به استاندارد دستورالعمل آزمایشهای تراوایی (شماره ۱۵۵ - الف طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) مراجعه شود.

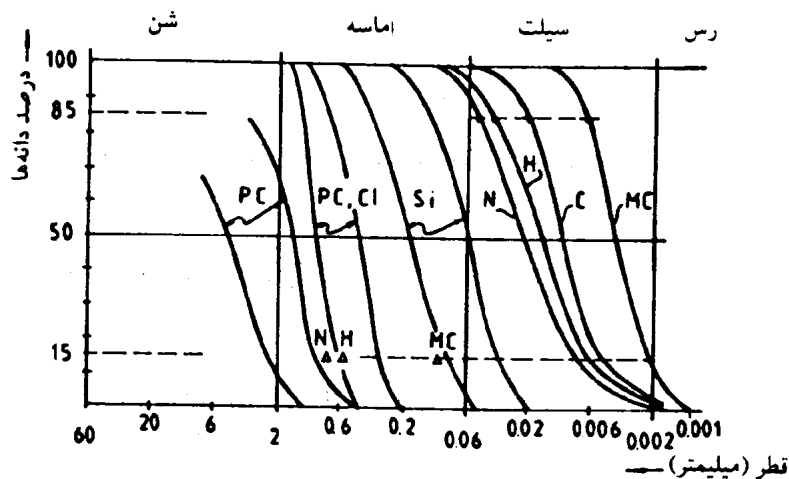
## ۳- مواد معلق، محلولها و رزینهای تزریق

بسته به هدف تزریق و خواص سنگ و خاک، مواد مختلفی برای تزریق به کار می رود. این مواد از دوغاب رقیق و غلیظ سیمان همراه با افزودنیهای لازم، ملات، محلولهای شیمیایی، رزینها، کفهای مصنوعی تا قیر داغ و امولسیون قیری تغییر می کند.

در سنگ شکافدار و محیط‌های دانه‌ای با تخلخل زیاد و حفره‌های بزرگ، دوغاب تزریق می‌شود. ملات که از ماسه ریز تا درشت، سیمان و موادی که قابلیت خمیری را بالا می‌برد، تشکیل شده است، برای بستن شکافهای بزرگ و غارها به کار می‌رود. در خاکهای دانه‌ریز متخلخل و سنگهای با ناپیوستگیهای ریز که دوغاب نمی‌تواند نفوذ کند، محلولهای شیمیایی و در فضاهای خالی، مواد ژله‌ای تزریق می‌شوند. در روشهای جدید تزریق، چند نوع رزین که گرانش آنها نظیر گرانش آب و نافذتر از محلولهای شیمیایی است به کار می‌رود. اندازه شکافها و حفره‌ها و ضریب تراوایی خاک و سنگ که با دوغابهای مختلف قابل تزریق است در شکل شماره ۱ نشان داده شده است و در شکل شماره ۲ نیز حدود تغییرات منحنیهای دانه‌بندی که با مخلوطهای مختلف قابل تزریق است، مشخص شده است.



شکل ۱- نمودار رابطه تراوایی، ابعاد فضای خالی و مصالح مناسب برای تزریق



توزیع دانه‌بندی و تزریق‌پذیری با: سیمان پرتلند (PC)، سیمان و رس (PC و CL)، سیلیکاتها (SI)، منحنیهای دانه‌بندی سیمان: نرمال (N)، مقاومت اولیه بالا (H)، کلوییدی (C)، فوق‌العاده ریز (MC) <sup>۱</sup>

شکل ۲- نمودار رابطه بین دانه‌بندی و مصالح مناسب برای تزریق

اجزایی که برای تهیه ملات و دوغابهای تزریق به کار می‌روند، عبارت از: سیمان (C)، بتونیت (B)، رس (CL)، ماسه و پرکننده‌ها (S)، افزودنیها (A) و آب (W) است.

برای بیان اجزای دوغاب روشهای مختلفی وجود دارد. در بعضی موارد این اجزا به صورت درصد حجمی و در موارد دیگر به صورت درصد وزنی بیان می‌شود. در مواردی نیز مقدار کیسه‌های سیمان در واحد حجم آب به کار می‌رود که باعث اشتباه بیشتری می‌شود، زیرا وزن یک کیسه سیمان ممکن است ۴۲/۶ کیلوگرم (۹۴ پوند کشور انگلیس)، ۵۰ کیلوگرم (اروپا و چند کشور دیگر) و یا ۴۰ کیلوگرم (استرالیا) باشد.

در این استاندارد به منظور اجتناب از هرگونه ابهام، نسبتهای مخلوط، وزنی است و مصرف ویژه تزریق به صورت وزن اجزای خشک بر حسب کیلوگرم در هر متر از گمانه بیان می‌شود.

ترکیب یک دوغاب به صورت وزن اجزای خشک در هر متر مکعب بیان می‌شود. به عنوان مثال اگر یک دوغاب تزریق شامل ۱ واحد وزنی سیمان، ۳/۷۵ واحد رس، ۰/۲ واحد بتونیت، ۰/۰۵ واحد مواد افزودنی و ۲ واحد آب در اجزای واحد باشد، به صورت  $W: 2 \quad A: 0.1 \quad B: 0.4 \quad CL: 0.75 \quad C: 0.2$  مشخص می‌شود.

معمولاً "میزان مواد افزودنی نظیر: ماسه و رس و... بر حسب درصدی از وزن سیمان خشک مورد استفاده در دوغاب نیز بیان می‌شود، به عنوان نمونه مناسب‌ترین مقدار بتونیت بین ۱ تا ۴ درصد وزنی سیمان مورد استفاده در دوغاب است.

### نفوذ دوغابها در شکافها و حفره‌ها

دوغابی که تحت فشار تزریق می‌شود، همانند مایع گرانبه در شکافها و حفره‌ها جریان می‌یابد تا اینکه مقداری از بزرگترین ذرات معلق در جایی که شکافها و حفره‌ها باریکتر از اندازه دانه‌ها هستند و یا در اثر افت فشار به علت وجود اصطکاک بین دانه‌ها و دیواره شکافها و یا در اثر تغییر ویسکوزیته متوقف و جریان قطع می‌شود.

با آزمایش فیلتر که به وسیله شرارد و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۸۴) مطرح شده، می توان قدرت نفوذ دانه های سیمان را در حفره هامحیطهای متخلخل همگن ارزیابی کرد. این آزمایشها نشان می دهد که دانه های به قطر  $d_{۸۵}^۲$  در دوغاب در لایه فیلتری که در آن  $D_{۱۵} = ۹d_{۸۵}$  باشد، مطمئناً باقی می ماند و اگر در فیلتر  $D_{۱۵} = ۲۰d_{۸۵}$  باشد، دانه های سیمان از آن عبور می کنند و ضریب تراوایی فیلتر در حدود  $K = ۰/۳۵ D_{۱۵}$  (بر حسب میلیمتر) است. حدود تغییرات توزیع دانه بندی چند نوع سیمان که در تزریق استفاده می شود، در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. از رابطه شرارد پیدا است که سیمان پرتلند معمولی (N) برای تزریق ماسه شنی با  $D_{۱۵} = ۰/۹۴$  میلیمتر و سیمان با مقاومت اولیه بالا (H) در ماسه درشت دانه با  $D_{۱۵} = ۰/۶۶$  میلیمتر، سیمان دانه ریز کلوییدی (C) در ماسه دانه متوسط با  $D_{۱۵} = ۰/۳۸$  میلیمتر و سیمان فوق العاده ریز (MC) در ماسه ریز دانه با  $D_{۱۵} = ۰/۱۲$  میلیمتر را می توان تزریق کرد. ضریب تراوایی نظیر از رابطه شرارد و سطح مخصوص سیمان و  $d_{۸۵}$  و  $d_{۱۵}$  مربوط در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- حدود نفوذ سیمان در خاکهای دانه ای

سیمان	سطح مخصوص (cm <sup>۲</sup> /gr)	$d_{۸۵}$ mm	$D_{۱۵}$ mm خاک	K (cm/s)
N	۳۱۷۰	۰/۰۴۷	۰/۹۴	$۲/۹ \times ۱۰^{-۱}$
H	۴۳۲۰	۰/۰۳۳	۰/۶۶	$۲/۳ \times ۱۰^{-۱}$
C	۶۳۲۰	۰/۰۱۹	۰/۳۸	$۱/۳ \times ۱۰^{-۱}$
Mc	۸۱۵۰	۰/۰۰۶	۰/۱۲	$۴/۲ \times ۱۰^{-۲}$

مواد متخلخل همگن را می توان همانند دسته لوله های مویین به قطر  $d_k$  در نظر گرفت که در آنها جریان آب آرام است. با محاسبه سرعت از قانون دارسی سرعت  $V=Ki$  و قانون هاگن - پوازوی  $V = \frac{d^۳ \gamma}{32 \mu}$  و مساوی قرار دادن دو رابطه، قطر لوله های مویین که با ضریب تراوایی مربوط اند به صورت زیر به دست می آید:

$$d_k = C \sqrt{K} \quad (۳)$$

که در آن C ضریب ثابت است. از این رابطه قطر لوله های مویین با ضریب تراوایی K که دوغاب با ماکزیمم اندازه دانه  $d_s$  می تواند در میان آنها جریان یابد به دست می آید و باید  $d_k > d_s$  باشد. مقدار ثابت C طبق نظر کلبرونر<sup>۴</sup> برابر  $C_1 = ۰/۱$  و طبق نظر کامبفورت<sup>۵</sup> در حدود  $۰/۰۸ < C_2 < ۰/۰۶$  است.

1 - Sherard et.al.

۲- قطر اندازه ای از ذرات که ۸۵٪ وزنی ذرات از آن کوچکتر است ( $d_{۸۵}$ ).

3 - Hagen -Poiseuille

4- Kolberunner

5- Cambefort

یک دسته از لوله‌های مویین با قطر  $d_k$  به عنوان مدل خاک متخلخل در نظر می‌گیریم که با خاکی با ضریب تراوایی  $K$  معادله ۴-۱ نظیر است و ماکزیمم قطر دانه‌های  $d_s$  را از شکل شماره ۱ می‌توان تخمین زد که برآوردی تقریبی است و به عنوان راهنمای عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل شماره ۱ نشان می‌دهد که می‌توان دوغابهای سیمان معمولی را در خاک متخلخل با  $K > 10^{-2}$  سانتیمتر بر ثانیه تزریق کرد (بعضی از مؤلفین  $K = 10^{-2}$  سانتیمتر بر ثانیه فرض می‌کنند) و دوغابهای رسی تا حد  $K = 10^{-4}$  سانتیمتر بر ثانیه و خاک با ضریب تراوایی کمتر فقط با محلولها یا رزینهای با گرانشی پایین قابل تزریق‌اند. پایین‌ترین حد ضریب تراوایی در هر حال  $K \cong 10^{-2}$  سانتیمتر بر ثانیه است، چون با ضریب تراوایی کمتر از این مقدار، سرعت تراوش آنقدر کم است که فقط حجم کمی از خاک اطراف قطعه مورد تزریق را می‌توان در یک دوره زمانی معقول تزریق کرد.

در مورد سنگهای شکافدار چون شکافهای سنگ عریضتر از قطر لوله‌های مویین با همان تراوایی هستند، عرض شکافها ۶ تا ۳۰ برابر بزرگتر از قطر نظیر  $d_k$  لوله‌های مویین است. بنابراین سنگ شکافدار با همان ضریب تراوایی  $K$  خاک متخلخل همگن با دوغابهای ذرات درشت‌تر از  $d_s$  ماکزیمم دوغاب مربوط به خاک تزریق می‌شود. دوغاب سیمان را می‌توان در سنگ شکافدار با تراوایی  $K \geq 1/5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  ( $N \approx 1 \text{ LU}$ ) تزریق کرد، حال آنکه محیط دانه‌ای با  $K < 10^{-2}$  سانتیمتر بر ثانیه با دوغاب سیمان تزریق‌پذیر نیست. تحت فشار تزریق، سرعت جریان دوغاب در شکافها و یا حفره‌ها، از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند و بستگی به گرادیان فشار، نسبت آب، گرانشی دوغاب و همچنین ابعاد، زبری و پیچ و خم مسیر گسستگیها و یا حفره‌ها دارد.

وقتی که گرادیان فشار برای غلبه بر مقاومت مقابل جریان دوغاب کافی نباشد، در این صورت جریان دوغاب تزریق شده متوقف و آنگاه ناحیه تزریق شده اشباع می‌شود.

دوغابهای تزریق را به سه رده ناپایدار، پایدار، و تیکسوتروپیک<sup>۱</sup> تقسیم می‌کنند.

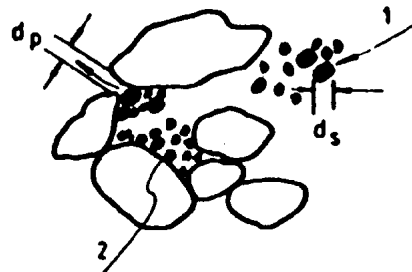
با دوغابهای ناپایدار، شکافها و یا حفره‌ها به دو طریق زیر پر می‌شوند:

- با ته‌نشینی در جایی که سرعت جریان کم می‌شود، مانند شکل شماره ۳-الف. در ناحیه ۱ از شکل یاد شده سرعت جریان زیاد است و ذرات کوچکتر از  $d_p$  حمل می‌شوند. در ناحیه ۲ سرعت جریان کم است به طوری که ذرات بزرگتر ته‌نشین می‌شود و متدرجاً فضای خالی را پر می‌کنند که در نتیجه مسیر جریان باریکتر می‌شود تا اینکه مقداری از دانه‌های بزرگتر  $d_s$  آن را مسدود می‌کنند.
- با جدا شدن آب از ذرات ته‌نشین شده در مسیری که در اثر نیروی نشت و گرادیان فشار در ناحیه ۱ مسدود شده است. افزایش بعدی فشار تزریق در امتداد شکاف مسدود شده (یا مسیر جریان در مواد دانه‌ای) در شکل شماره ۳-ب به صورت طرح کلی نشان داده شده است. افزایش گرادیان فشار، ذرات ته‌نشین شده را فشرده کرده و موادی را که در آن تزریق شده است، تحکیم می‌کند.

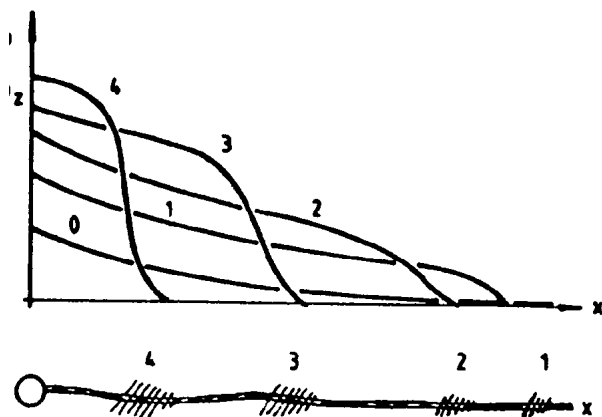
1 - Thixotropic



الف



ب



(الف) رسوبگذاری ذرات معلق، (۱) سرعت زیاد که ذرات  $d_s$  از میان حفره‌ها حمل می‌گردند. (۲) معبر بستن  $d_p$  (۳) سرعت کم، با ته‌نشینی ذرات و پر شدن حفره‌ها.

(ب) مسدود شدگی بعدی شکاف،  $x$  مسیر امتداد شکاف،  $P$  توزیع فشار تزریق بعدی در امتداد شکاف، ۱ تا ۴ مقاطع باریک مسدود شده بعدی شکاف و توزیع فشار در امتداد شکاف

### شکل ۳- فرایند پر شدن حفره‌ها و شکافها

در هر دو مورد، مقاومت نهایی دوغاب پرکننده شکافها به فشار تزریق، گرادیان فشار در محل‌های مختلف خصوصاً در مرحله اشباع بستگی دارد. شرایط لازم برای پیشرفت فرآیند تزریق، نسبت مناسب  $\frac{d_p}{d_s}$  است ( $d_p$  بازشدگی شکافها یا حفره‌ها و  $d_s$  اندازه ماکزیمم دانه‌های دوغاب است). اگر این نسبت بزرگ باشد، انسداد معبرها مشکل است و مواد تزریق شده بعد از ته‌نشست، فشرده نمی‌شوند و نرم باقی می‌مانند که در این صورت دوغاب تلف می‌شود و اثربخشی آن ناچیز خواهد بود. اگر این نسبت کم یا کوچکتر از یک باشد، اغلب شکافها و مسیرهای جریان در دیواره‌های گمانه تزریق، مسدود نمی‌شوند و یا شعاع تاثیر آن کم خواهد بود. با دوغابهای پایدار، دانه‌های درشت‌تر در حین تزریق ته‌نشین نمی‌شود، بلکه از میان شکافها یا حفره‌ها عبور می‌کند تا اینکه مقاومت جریان در اثر گرانش، بر گرادیان فشار در فاصله دورتر از گمانه غلبه کند. همان‌طور که گفته شد، مسیرهای باریک جریان ممکن است با عبور دوغاب مسدود شود. با افزایش فشار دوغاب، در شکافهای ریزتر مجاور، آب از دوغاب جدا شده و مواد معلق در دوغاب تحکیم می‌شود، به این ترتیب مقاومت اولیه‌ای به دست می‌آید که به گیرش سیمان بستگی ندارد.

دوغابهای تیکسوتروپیک با تشکیل ژل نرم، مقاومت در حال سکون ایجاد می‌کنند. وقتی که این مواد در سازندی با تراوایی زیاد تزریق شوند، این خاصیت سبب انسداد راه نفوذ در فاصله‌ای از گمانه می‌شود و از نفوذ بیشتر دوغاب به داخل حفره‌های بزرگ جلوگیری می‌کند. در این مورد، مقاومت نهایی مواد تزریق شده به ترکیب دوغاب بستگی دارد و تحکیم اولیه در اثر فشار نشت قابل انتظار نیست.

### ۲-۳ مواد مورد استفاده در دوغاب

#### ۱-۲-۳ سیمان پرتلند

سیمان پرتلند بخش اصلی دوغاب است که عمدتاً در بازار با انواع مختلف از جمله سیمان کوره بلند یا متالورژی، سیمان پوزولانی و سیمان مقاوم در مقابل سولفات در دسترس است. علاوه بر آن سیمانها بر حسب مقاومتی که به دست می‌دهند و گرمایی که به هنگام گیرش ایجاد می‌کنند، طبقه‌بندی می‌شوند. در کشورهای مختلف استانداردهای گوناگونی وجود دارد که خواص و مشخصات سیمان مثل ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و مقاومت حداقل را تعریف می‌کنند. ترکیب شیمیایی سیمان باید با حدود استاندارد شده مقدار  $SO_3$ ،  $MgO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $CaO$ ، مواد غیر واکنشی اضافه شده، خاکستر بادی<sup>۱</sup> و مواد پوزولانی مطابقت کند.

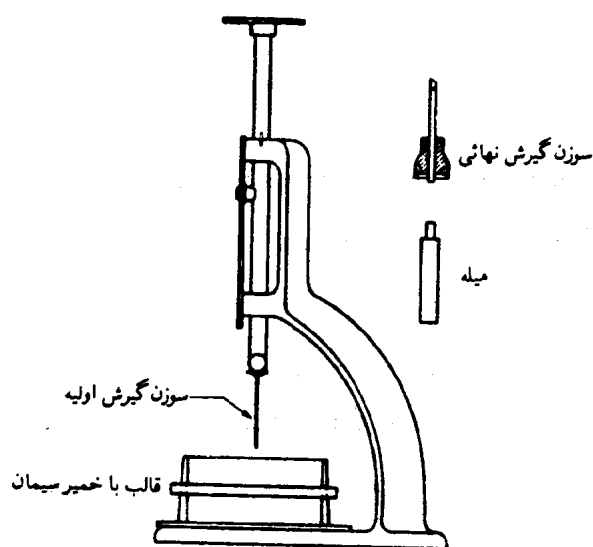
خواص فیزیکی استاندارد شده سیمان عبارتند از:

- ریزی دانه‌ها<sup>۲</sup> یا ذرات تشکیل دهنده که با درصد دانه‌های به قطر بزرگتر از  $0.09\%$  میلیمتر و سطح مخصوص (بر حسب  $cm^2/gr$ )، بیان می‌شود.
- جرم واحد حجم  $gr/cm^3$
- زمان شروع و خاتمه گیرش
- تغییر شکل نسبی<sup>۳</sup> طولی و حجمی بعد از گیرش
- مقاومت فشاری بعد از ۳، ۷ و ۲۸ روز

این خواص با آزمونهای آزمایشگاهی استاندارد، تعیین می‌شوند.

مهمترین خاصیت برای انتخاب سیمان تزریق، ریز بودن ذرات آن است که برای خاکهای دانه‌ای و سنگهای با شکافهای باریک، باید تا حد ممکن ریز باشد.

خاصیت دیگر سیمان، گیرش است که برای بیان سفت شدن خمیر سیمان به کار می‌رود. گرچه به هنگام گیرش، خمیر مقاومت اندکی کسب می‌کند، لیکن برای مقاصد عملی بهتر است که «گیرش» از «سخت شدن» که به معنی کسب مقاومت است متمایز شود. در عمل واژه‌های گیرش اولیه و گیرش نهایی برای بیان مراحل مختلف گیرش که به طور اختیاری انتخاب می‌شوند، به کار می‌روند. فرآیند گیرش با تغییراتی در دمای خمیر سیمان همراه است. گیرش اولیه با افزایش سریع گرما و گیرش نهایی با حداکثر دما همراه است. زمانهای گیرش سیمان را با استفاده از دستگاه ویکات و سوزنهای نفوذی مختلف (شکل شماره ۴) اندازه می‌گیرند.

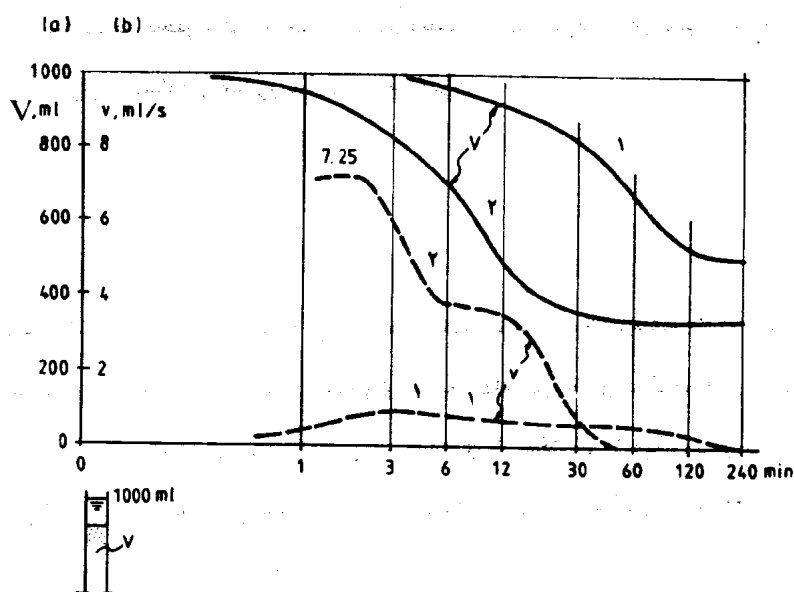


شکل ۴- دستگاه ویکات

برای تعیین گیرش اولیه از یک سوزن با مقطع دایره به قطر  $0.5 \pm 0.13$  میلی‌متر استفاده می‌کنند. این سوزن بر اثر وزن مشخص، به منظور نفوذ به داخل خمیری باروانی استاندارد که در داخل قالب مخصوصی قرار دارد، به کار می‌رود. وقتی خمیر به حد کافی سفت شده باشد که سوزن فقط تا  $5 \pm 1$  میلی‌متر از کف قالب نفوذ کند، در این حالت گفته می‌شود که گیرش اولیه رخ داده است. گیرش اولیه را بر حسب زمان سپری شده از هنگام مخلوط کردن آب با سیمان محاسبه می‌کنند.

گیرش نهایی به وسیله سوزن مشابهی اندازه‌گیری می‌شود که بر روی آن کلاهکی تعبیه شده است که لبه تیز دایره‌ای شکل به قطر ۵ میلی‌متر دارد و این لبه  $0.5$  میلی‌متر بالاتر از نوک سوزن قرار می‌گیرد. گیرش نهایی وقتی اتفاق می‌افتد که این سوزن که به آرامی تا سطح خمیر پایین آمده است، به داخل خمیر فرورود و لبه تیز کلاهک با سطح خمیر تماس شود. زمان گیرش نهایی را از زمان افزودن آب به سیمان می‌سنجند (به استاندارد ASTM مراجعه شود).

تورم بعد از گیرش مطلوب است، زیرا فشار موجود در شکافهای تزریق شده را افزایش می‌دهد. سیمان پرتلند تجارتي اساساً دانه ریز است (سطح مخصوص آن براساس روش بلین<sup>۱</sup> برابر  $3400 \text{ cm}^2/\text{g}$  است) و بدون هیچ محدودیتی می‌توان آن را برای تزریق به کار برد. وقتی که برای تهیه دوغاب از مخلوط کننده‌های با جریان کاملاً مغشوش استفاده می‌شود، ریزی سیمان افزایش می‌یابد خصوصاً اگر مخلوط غلیظ تهیه شود ( $1 \text{ W} : 0.8 \text{ C}$ ) که بعداً بر حسب نیاز رقیق می‌شود. اثر چنین روشی بر زمان رسوبگذاری و حجم، که به ابعاد ذرات سیمان بستگی دارد، در شکل شماره ۵ نشان داده شده است.



۱- مخلوط کننده با جریان کاملاً مغشوش

۲- مخلوط کننده آزمایشگاه

۳-  $V$ : حجم رسوب

۴-  $v$ : سرعت رسوبگذاری دوغاب

شکل ۵- تاثیر روش مخلوط کردن بر رسوبگذاری دوغاب سیمان

رسوبگذاری نمونه دوغاب  $1 \text{ C} : 3 \text{ W}$  در مخلوط کن با جریان کاملاً مغشوش خیلی کمتر از نمونه‌ای است که با همان سیمان و فقط با به هم زدن دوغاب در لوله آزمایشگاهی تهیه می‌شود (زیرا طبق قانون استوکس میزان دانه‌های کروی ته‌نشین شونده در آب متناسب با مجذور قطر دانه‌هاست). قطر متوسط ذرات سیمان مخلوط شده در مخلوط کن با

جریان کاملاً مغشوش را می توان به کمک قطر متوسط دانه ها در دوغابی که در آزمایشگاه تهیه می شود از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$(4) \quad \text{قطر متوسط ذرات آزمایشگاهی} \times 0/37 = \text{قطر متوسط ذرات سیمان در مخلوط کن}$$

تجربه نشان داده است سیمانی را که کمتر از ۱۰٪ دانه های بزرگتر از ۰/۰۹ میلی متر و سطح مخصوص  $2700 \text{ cm}^2/\text{g}$  یا بیشتر دارد، می توان برای تزریق در سنگهای حاوی شکافهای باریک با ضریب تراوایی بیشتر از ۱ واحد لوژون به کار برد، به شرطی که دوغاب در مخلوط کن با جریان کاملاً مغشوش تهیه شود. برای بهبود نتایج، می توان دانه های درشت موجود در دوغاب را با استفاده از هیدروسیکلون<sup>۱</sup> جدا کرد.

### ۳-۲-۲ رس

رس را به عنوان پرکننده دانه ریز به دوغاب اضافه می کنند تا از مصرف سیمان کاسته شود و در عین حال پایداری و گرانی دوغاب را نیز بهبود بخشد. برای تزریق در سنگهای با شکافهای باریک و خاک دانه ای با کمی مواد سیلنتی و ماسه ریز دانه، از دوغاب رسی استفاده می شود. نام رس به دانه های کوچکتر از ۲ میکرون و همچنین گروه ویژه کانیهای رسی اطلاق می شود. رسها به طور کلی متشکل از ذرات کانیهای طویل و پولکی به ابعاد ذرات کلوییدی و کمتر از ۲ میکرون هستند.

مهمترین اجزای معدنی انواع خاکهای رسی، سیلیکاتهای هیدراته آلومینیوم هستند که در بعضی انواع آن آهن و منیزیم نیز ممکن است به جای آلومینیم قرار گیرد. این سیلیکاتهای هیدراته آلومینیم معمولاً از واحدهای ساختاری مرکب از واحد چهار وجهی سیلیس و واحد هشت وجهی اکسید هیدراته آلومینیوم (گیبسیت<sup>۲</sup>) تشکیل می شوند. واحد سیلیس یک چهار وجهی است که در چهار گوشه آن یون اکسیژن قرار گرفته و در مرکز آن یک یون سیلیس قرار دارد (شکل شماره ۶).

کانیهای رسی بر مبنای ساخت بلورین و ترکیب شیمیایی به چند گروه تقسیم می شوند. گروههای اصلی کانیهای رسی عبارتند از: کائولینیت، هالوئیزیت، ایلیت و مونت مورینیت. گروههای فرعی کانیهای رسی عبارتند از: ورمیکولیت و کلریت که در توده های سنگی تجزیه شده فراوان هستند و به سادگی به انواع دیگر تجزیه می شوند. ویژگیهای گروههای اصلی کانیهای رسی در جدول شماره ۲ آمده است.

1. Hydrocyclone

2. Gibbsite

جدول ۲- ویژگیهای کانیهای رسی اصلی

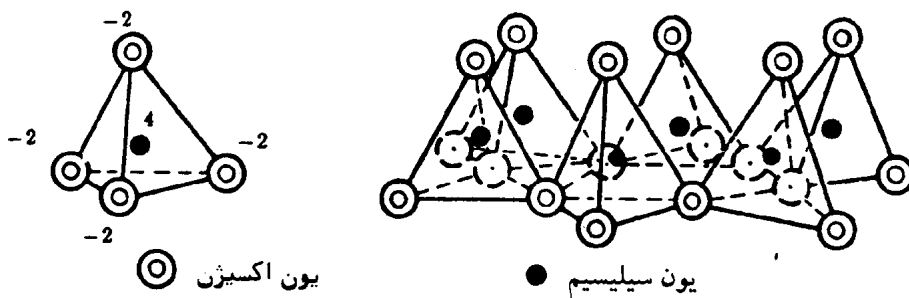
ذرات	فعالیت	منشاء	کانی رسی
صفحه‌ای ولی کلوخه‌ای	پایین. در حضور آب موادی نسبتاً پایدارند	- هوازدگی شیمیایی فلدسپاتها - تجزیه نهایی میکاها و پیروکسنها در آب و هوای مرطوب یا در شرایط با زهکشی خوب - در آب و هوای گرم و مرطوب و گرم و استوایی بخش اصلی خاکهای رسی را تشکیل می‌دهد.	کائولینیت <sup>۱</sup>
واحد‌های طویل میله‌ای یا توخالی	پایین. مگر آنکه ویژگیهای رس بر اثر از دست دادن شدید آب اساساً تغییر یافته باشد، فرآیند قابل بازگشت نیست.	- مشابه کائولینیت است، ولی از هوازدگی فلدسپات و میکا (سنگهای اسیدی) حاصل می‌شود.	هالوئیزیت <sup>۲</sup>
صفحات نازک	حد واسط بین مونت‌موریونیت و کائولینیت	- بخش اصلی بسیاری از سنگهای رسی	ایلیت <sup>۳</sup>
در میکروسکوپ الکترونی به صورت توده‌ای شبیه به برگهای ظریف بریده شده کاهو دیده می‌شود.	- شدیداً متورم شونده‌اند. - مشکل آفرین‌ترین کانی رسی در دامنه‌ها و درزیر پی‌هاست. - به عنوان عامل نفوذناپذیر کننده به کار می‌رود.	- تجزیه شیمیایی الیون (سنگهای مافیک) - تجزیه بخشی میکاها و پیروکسنها در محیطهای دارای بارندگی کم یا زهکشی ناچیز جزء تشکیل دهنده شیل‌های دریایی و شیل‌های رسی - تجزیه سنگ بر اثر گسل خوردگی	مونت‌موریونیت <sup>۴</sup> (اسمکتیت)

1. Kaolinite

2. Halloysite

3. Illite

4. Montmorillonite (smectite)

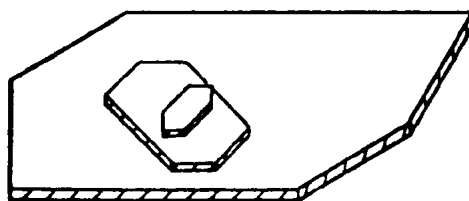
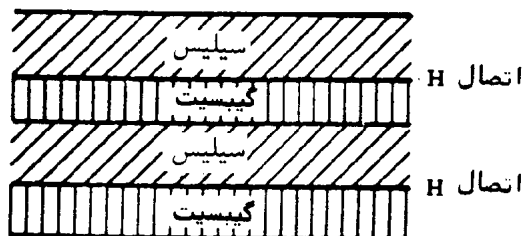


شکل ۶- واحد بنیانی سیلیس

برای تزریق معمولاً رسهای نوع کائولینیت، مونت مورینیت و بتونیت به کار می‌روند، لذا ساختمان و خصوصیت آنها را به اختصار بررسی می‌کنیم.

#### کائولینیت

این نوع رس از تجزیه شیمیایی فلدسپاتها و سایر کانیهای آلومینیم‌دار حاصل می‌شود. ساختار بلورین آن مرکب از لایه‌های متناوب سیلیس و گیبسیت است که هر لایه از اتصال هیدروژنی بین قاعده سیلیس و لایه گیبسیت تشکیل می‌شود (شکل شماره ۷):

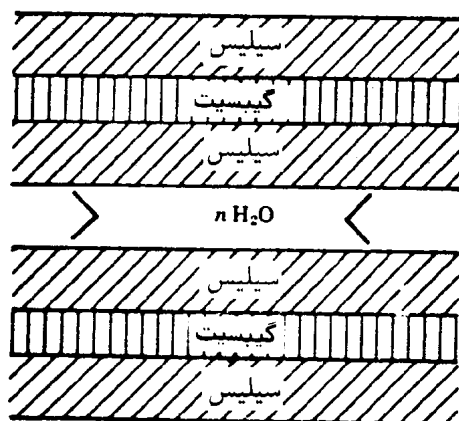


شکل ۷- ساختمان کائولینیت

اتصال ضعیف هیدروژنی باعث می‌شود که بلورهای کائولینیت به صفحات بسیار نازک تقسیم شوند. صفحات بلور کائولینیت در سطح خود مقداری بار منفی حمل می‌کنند و این بار منفی باعث جذب لایه‌های ضخیم آب به دور ذرات آن می‌شود، لذا مجاورت کائولینیت با آب به آن خاصیت پلاستیسته می‌بخشد. کائولینیت کم یا بیش به صورت صفحات شش ضلعی به ابعاد  $0/1$  تا  $4$  میکرون و ضخامت این صفحات بین  $0/5$  تا  $2$  میکرون است. سطح مخصوص کائولینیت  $10$  تا  $20$  مترمربع بر گرم، جرم مخصوص آن  $2/6$  تا  $2/68$  گرم بر سانتیمتر مکعب و ظرفیت تبادل یونی آن  $3$  تا  $15$  میلی‌اکی‌والان در  $100$  گرم است. کائولینیت در دوغابهای سیمان - رس به‌عنوان پرکننده مصرف زیادی دارد.

## ۲- مونت مورینیت

نظیر کائولینیت، بلورهای مونت مورینیت نیز مرکب از لایه‌های سیلیس و گیبسیت است. در این حالت هر لایه گیبسیت بین دو لایه سیلیس قرار گرفته و لایه‌های سیلیس در دو طرف در معرض محیط مجاور خود قرار می‌گیرند که به علت بار منفی موجود در سطح، مولکولهای آب را به سمت خود جذب می‌کنند، لذا صفحات بنیادی سیلیس - گیبسیت - سیلیس با لایه آب بین آنها متصل می‌شوند (شکل شماره ۸).



شکل ۸- ساختمان مونت مورینیت

فاصله بین صفحات بنیادی سیلیس - گیبسیت - سیلیس به مقدار آب موجود بستگی دارد و به این دلیل یون مونت مورینیت را دارای شبکه منبسط شونده می‌نامند که نقطه مقابل شبکه ثابت کائولینیت و ایلیت و سایر انواع رس است. این خاصیت مونت مورینیت برای تزریق بسیار مهم است. ذرات مونت مورینیت به صورت صفحه‌ای با ابعاد  $1-2$  میکرون هستند و ضخامت آنها از  $10^{-3}$  تا  $2 \times 10^{-3}$  میکرون تغییر می‌کند. سطح مخصوص مونت مورینیت در حالت خشک بین  $50$  تا  $120$  مترمربع بر گرم و بعد از تورم و پخش در آب  $700$  تا  $800$  مترمربع بر گرم است. جرم مخصوص آن بین  $2/35$  تا  $2/70$  گرم بر سانتیمتر مکعب و ظرفیت تبادل یونی آن  $80$  تا  $150$



میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم است. مونت‌موریونیت برای تهیه دوغاب سیمان پایدار و دوغاب نیکسوتروپیک و همچنین برای خمیری کردن ملات غلیظ به منظور تزریق در شکافها و حفره‌های بزرگ کاربرد دارد.

- بنتونیت

از انواع سیلیکاتهای آبدار آلومینیم است و قسمت اعظم آن را مونت‌موریونیت همراه با سایر کانیهای گروه کائولن تشکیل می‌دهد. این نوع رس نسبت به سایر ترکیبات گروه کائولن درصد بیشتری سیلیس، اکسیدهای منیزیم، کلسیم، پتاسیم و سدیم دارد. در رسوبات بنتونیت، کلسیت یافت می‌شود که شامل یون کلسیم جذب شده در شبکه بلورین است. حدود آتربرگ چنین بنتونیتی  $\frac{30}{100}$  درصد است. وقتی که یون سدیم جایگزین یون کلسیم شود، حدود آتربرگ تا  $\frac{50}{40}$  درصد افزایش می‌یابد.

ویژگیهای عمده کانیهای رسی عبارتند از: همچسبی<sup>۱</sup>، دگرچسبی<sup>۲</sup>، خمیری بودن، سفتی<sup>۳</sup> و فعالیت<sup>۴</sup> یا واکنش‌پذیری که از این میان سفتی و فعالیت اهمیت بیشتری در تزریق دارند.

با کاهش مقدار رطوبت، رسها از حالت مایع (خیلی نرم) به ترتیب به حالت خمیری، نیمه‌جامد و نهایتاً حالت سخت و جامد تبدیل می‌شوند. درصد رطوبت مصالح در حد فاصل بین این حالتها به نام «حدود آتربرگ» معروف است که مقادیر آنها باتوجه به نوع و درجه خلوص رسها متفاوت است. خاکهای رسی معمولاً با رابطه بین شاخص خمیری (PI) و حد روانی (LL)، شناسایی می‌شوند.

به تمایل رسها برای جذب رطوبت، افزایش حجم آنها بر اثر ازدیاد رطوبت (تورم) یا کاهش حجم آنها بر اثر کم شدن رطوبت (انقباض) فعالیت اتلاق می‌شود. این عمل ناشی از ساختار بلورین و ترکیب شیمیایی رسها است. میزان فعالیت وابسته به درصد رس موجود در نمونه و نوع کانی رسی است. فعالیت را به صورت نسبت بین شاخص خمیری به درصد وزنی ذرات کمتر از ۲ میکرون تعریف می‌کنند. رسها را بر مبنای فعالیت، به صورت زیر طبقه‌بندی می‌کنند:

- رسهای غیرفعال (کائولینیت) :  $0/75 < \text{فعالیت}$

- رسهای معمولی (ایلیت) :  $0/75$  تا  $1/25$  فعالیت

- رسهای فعال (مونت‌موریونیت) :  $1/25 > \text{فعالیت}$

1. Cohesion

2. Adhesion

3. Consistency

4. Activity

وقتی که تزریق باید در سیستم گسستگیهای باز و حفره‌ها انجام گیرد، به دوغاب پایدار ماسه اضافه می‌کنند. اندازه حداکثر دانه‌های دوغاب طوری انتخاب می‌شوند که با اندازه بازشدگی گسستگیها تطابق داشته و با پمپ تزریق، لوله‌ها و لوازم در دسترس مناسب داشته باشند. به ویژه در گسستگیهای بازی که در آن آب جریان دارد و باید تزریق انجام شود. ممکن است چند نوع پرکننده به دوغاب پایدار یا حتی تیکسوتروپیک افزوده شود. این پرکننده‌ها را می‌توان از میان خاکاره، تراشه‌های چوب، نوارهای سلوفان، پلی وینیل یا پلی استر انتخاب نمود. شکافهای پشت تعدادی از چشمه‌ها تا دبی ۲ مترمکعب بر ثانیه را توانسته‌اند با افزودن تراشه‌های اسفنج مصنوعی به دوغاب با موفقیت مسدود کنند.

### ۴-۲-۳ عوامل پراکنش<sup>۱</sup>

هر چند نیروهایی که در صفحات بین ورقهای کانیهای رسی اثر می‌کنند ضعیف‌اند، ولی بارهای الکتریکی نامتعادل در مقاطع بین ورقها وجود دارد که همدیگر را جذب می‌کنند و ممکن است بلورهای منفرد مجاور را به صورت انباشتگی بزرگ (پولکها) متصل سازند. دوغابی که چنین انباشتگی از دانه‌های رس داشته باشد، دارای خاصیتی است که آن را با دوغابی که فقط با دانه‌های منفرد پراکنده ساخته شده است، متفاوت می‌سازد. چنین دوغابی کمتر پایدار است و گرانیوی آن بیشتر است و برای تزریق مناسب نیست. برای جلوگیری از توده شدن<sup>۲</sup> (انعقاد) در دوغاب رسی، مقدار کمی از یونی که موسوم به پراکنده‌ساز<sup>۳</sup> است اضافه می‌شود تا بار نامتعادل را در لبه‌های بلورهای منفرد خنثی سازد، به گونه‌ای که متقابلاً یکدیگر را دفع کنند. دانه‌های رس به صورت معلق و منفرد در می‌آیند و اندازه متوسط دانه‌های معلق آن خیلی کوچکتر از دوغاب توده شده همان رس است.

مناسبتین پراکنده‌سازها، املاح فلزات هستند که سبب بیشترین افزایش حد پلاستیسیته رس می‌شوند. کاتیون فلزات سبک با چنین خاصیتی به ترتیب لیتیوم، سدیم و پتاسیم هستند.

املاح لیتیوم به علت گرانی و املاح پتاسیم به علت فعالیت کم کاربرد کمتری دارند، ولی متقابلاً از کربنات سدیم<sup>۴</sup> یا بی‌کربنات سدیم<sup>۵</sup> استفاده بیشتری می‌شود.

1- Plastifying

2- Flocculation

3- Plastifier

4- Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

5- NaHCO<sub>3</sub>

نسبت وزنی بهینه پراکنده‌سازی که باید افزوده شود به ترکیب کانیهای دانه رس بستگی دارد و با نسبت وزنی رس در آزمونهای آزمایشگاهی ساده تعیین می‌شود که انجام دادن آن در محل ساختگاهها نیز به‌سهولت امکانپذیر است. در چند لوله مدرج آزمایشگاهی به ظرفیت ۵۰۰ سانتیمتر مکعب مخلوط رس و آب مقطر به نسبت ۱CL:۳W تا ۱CL:۵W به‌صورت معلق ساخته می‌شود و مقادیر متفاوتی از پراکنده‌سازی که بین ۵/۰ تا ۵ درصد تغییر می‌کند به هر لوله اضافه می‌شود. دو غاب برای مدت ۱۰ دقیقه به شدت مخلوط شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت رها می‌شود. بعد از آن حجم رسوب را اندازه‌گیری می‌کنند. نمونه‌ای که بیشترین حجم رسوب را ارائه دهد نمونه‌ای است که نسبت بهینه پراکنده‌سازی را دارد.

برای تهیه دوغاب سیمان، پراکنده‌سازی تجارتي در دسترس است. قابلیت پمپ کردن دوغاب غلیظ سیمان و ملات ممکن است با افزودن عوامل ایجاد حباب هوا بهبود یابد. نسبت مخلوط بهینه در آزمایشگاه همانند مصالح رس که قبلاً توضیح داده شد تعیین می‌شود.

وقتی که تزریق در مقطع کم عمق گمانه‌ها انجام می‌گیرد، ممکن است افزودن مقداری تسریع کننده برای گیرش (زودگیر) و کسب مقاومت اولیه برای بند آوردن نشت سطحی مفید باشد. اغلب، علاوه بر کربنات سدیم، مقداری از محصولات تجارتي موجود در دسترس مثل کلرورکلسیم نیز به کار می‌رود. هر دو مواد، مقاومت نهایی را مقداری کاهش می‌دهند، ولی اثر کلرورکلسیم بیشتر است؛ زیرا پلاستیسیته دوغاب محتوی بتونیت را نیز تقلیل می‌دهد.

### ۳-۳ خواص دوغابهای تزریق

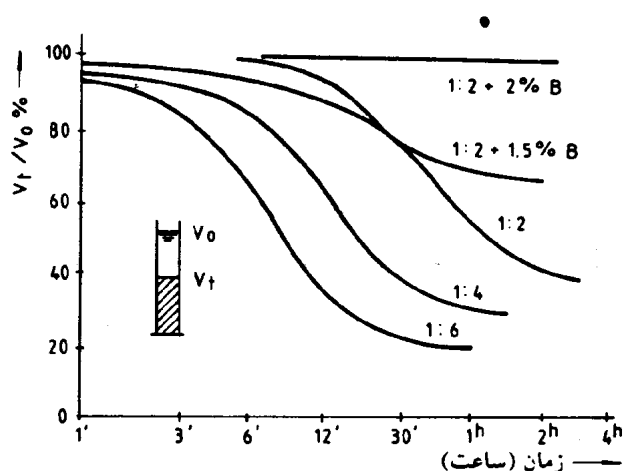
بسته به مورد، ترکیب و خواص دوغابهای تزریق در مرحله طراحی پروژه تعریف و مشخصات دوغاب و توده تزریق شده در آزمایشگاه تعیین می‌شود. آزمایشهای مربوط عبارتند از:

- اجزای دوغاب و نسبت اختلاط آنها
- پایداری دوغاب
- گرانی
- تیکسوتروپی مخلوطهای انتخابی
- کسب مقاومت نسبت به زمان، (مقاومت دوغاب تزریق شده)
- مقاومت دوغاب تزریق شده در مقابل فرسایش

وقتی که امکان انتخاب وجود دارد، باید مناسبترین اجزا از طریق آزمونهای اولیه آزمایشگاهی پیش بینی شود و در مرحله بعد فقط این اجزا به‌طور جامعتري آزمایش شوند. ترکیب نهایی دوغابهای مختلف باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که خواص مهم مثل پایداری، روانی و تیکسوتروپی تأمین شود.

ذرات دانه‌ای معلق در دوغاب ساکن، تحت تأثیر نیروی وزن، با سرعتی که متناسب با مجذور قطر ذرات است ته‌نشین می‌شوند. در ابتدا ذرات درشت و سپس ذرات ریز رسوب می‌کنند. ذرات خیلی ریز نه تنها تحت تأثیر نیروی وزن قرار می‌گیرند بلکه نیروهای الکتروشیمیایی نیز متقابلاً بر آنها عمل می‌کنند و حرکت براونی<sup>۱</sup> در دوغاب با ذرات کلوییدی کمتر از ۱ میکرون ظاهر می‌شود، به طوری که سرعت رسوبگذاری کمتر از سرعتی است که از قانون استوکس به دست می‌آید.

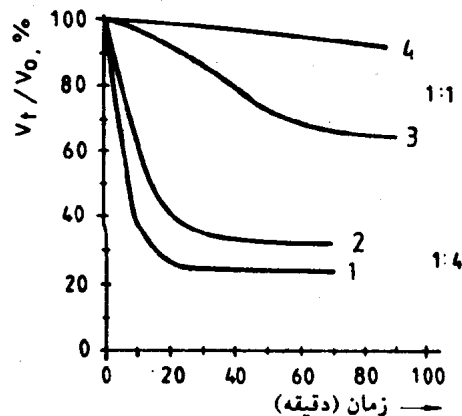
دوغابهای تزریقی که ذرات آنها در مدت ۲۴ ساعت به هیچ وجه ته‌نشین نشوند به دوغابهای پایدار موسوم‌اند. این دوغابها باید به دقت تهیه شوند. ممکن است مقدار کمی آب زلال در سطح دوغاب ظاهر شود که این امر ناشی از رسوبگذاری ذرات نیست، بلکه پیامد انقباض حجمی در اثر عمل نیروهای الکتروشیمیایی و وزن در حجم کل دوغاب است. پایداری دوغابهای تزریق، با آزمونهای ساده آزمایشگاهی تعیین می‌شود. به این منظور، مقدار معینی از اجزای (سیمان، رس، بنتونیت و غیره) مخلوط می‌شود و در آب به حالت معلق در می‌آید (آب مقطر در مطالعات نظری و آب محل کار برای مطالعات عملی) تا نمونه‌های دوغاب با ترکیب و چگالی دلخواه به دست آید. روشهای مخلوط کردن نیز ممکن است تغییر کند، به طوری که عمل مخلوط کردن با وسایل مورد استفاده در جایگاه همخوانی داشته باشد. سپس دوغاب در لوله آزمایشگاهی به ظرفیت ۱۰۰۰ سانتیمتر مکعب ریخته می‌شود و در حالت سکون قرار می‌گیرد. در فواصل زمانی دلخواه، حجم آب زلال جمع شده در بالای دوغاب تعیین و نتیجه به صورت نموداری همانند شکل شماره ۹ تهیه و نشان داده می‌شود:



شکل ۹- رسوبگذاری دوغابهای سیمان با چگالیهای مختلف و بنتونیت افزوده شده

1 - Brownian motion

در این شکل، تأثیر چگالی اولیه مخلوط و تأثیر بتونیت اضافه شده در پایداری دوغاب با همان چگالی نشان داده شده است. در شکل شماره ۱۰ تأثیر نرمی سیمان بر رسوبگذاری دوغاب دیده می‌شود:



۱ و ۳ با نرمی  $۳۲۰۰ \text{ cm}^2/\text{gr}$  و ۲ و ۴ با نرمی  $۶۳۵۰ \text{ cm}^2/\text{gr}$

شکل ۱۰- رسوبگذاری دوغابهای سیمان با نرمی و نسبتهای آب متفاوت

دوغابهای سیمان را می‌توان با افزودن مقدار کمی بتونیت فعال شده و یا مقداری پراکنده‌ساز، کاملاً پایدار کرد. بتونیت به عنوان عامل معلق‌کننده دوغاب عمل و از ته‌نشینی ذرات سیمان در دوغاب جلوگیری می‌کند. دوغابهای رسی را می‌توان با اضافه کردن الکترولیتهایی نظیر: نیترات سدیم، کربنات پتاسیم، آلومینات سدیم، سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم پایدار کرد.

### ۲-۳-۳ گرانروی دینامیکی

گرانروی خاصیتی از سیال است که در مقابل تغییر سرعت قشرهای مختلف سیال در حال حرکت، مقاومت می‌کند. در سیالات نیوتونی معادله زیر صادق است:

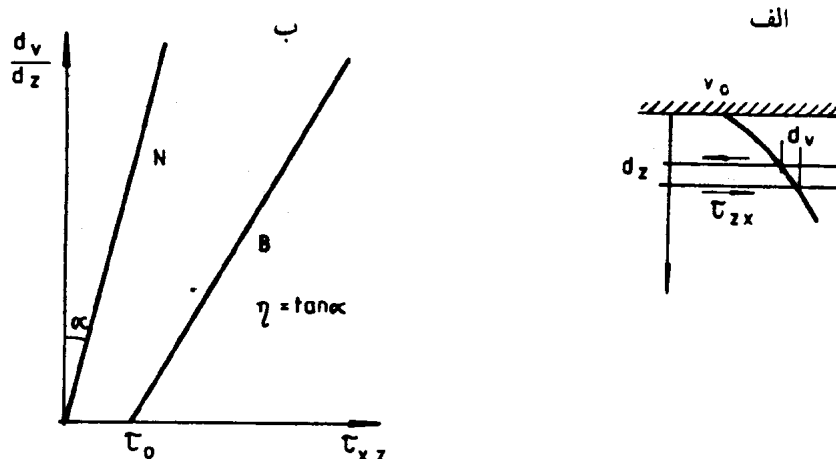
$$\tau_{xz} = \eta \frac{dv}{dz} \quad (5)$$

که در آن  $\eta$  ضریب گرانروی دینامیکی و  $\frac{dv}{dz}$  گرادیان سرعت در مقطع است. دوغابها معمولاً مانند سیالات نیوتون

رفتار نمی‌کنند، بلکه جزء سیالات بینگهام<sup>۱</sup> هستند که معادله زیر در مورد آنها صدق می‌کند:

$$\tau_{xz} = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dz} \quad (۶)$$

که در آن  $\tau_0$  مقاومت آستانه‌ای است. این دو رابطه در شکل شماره ۱۱ به صورت ترسیمی نشان داده شده است.



الف - توزیع سرعت در لوله‌ها  
ب - نسبت بین گرادیان سرعت و مقاومت برشی  $N$  سیال نیوتونی و  $B$  سیال بینگهامی

شکل ۱۱- گرانیوی مایعات

چند نوع گرانیوی سنج دورانی وجود دارد که یکی از آنها نوع استورمر<sup>۲</sup> است که در شکل شماره ۱۲- الف دیده می‌شود. نمونه دوغاب مورد آزمایش را در ظرف آزمایش می‌ریزند و استوانه فلزی را که قسمت تحتانی آن باز است در ظرف قرار می‌دهند. استوانه با وسیله انتقال مناسبی می‌چرخد و کفه با وزنه سربی بارگذاری می‌شود تا اینکه سرعت دوران به ۶۰۰ دور در دقیقه برسد. با استفاده از میزان بارگذاری، ضریب گرانیوی از منحنی مدرج شده دستگاه که در شکل شماره ۱۲- ب نشان داده شده است، به دست می‌آید.

برای مقاصد عملی ممکن است روش ساده‌تری به کار رود که معمولترین آنها قیف مارش<sup>۳</sup> مطابق استاندارد API<sup>۴</sup> است که در شکل شماره ۱۳ دیده می‌شود. در این مورد، گرانیوی بر حسب زمان (ثانیه) مورد نیاز عبور جریان

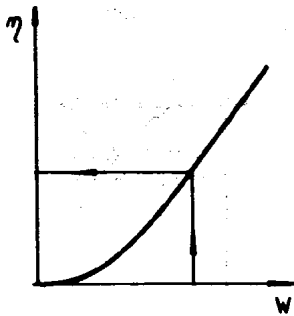
1- Bingham

2- Stormer

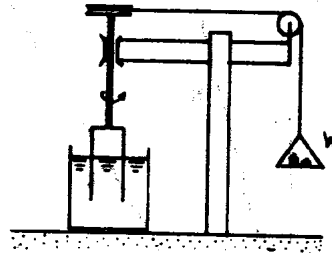
3- Marsh

4- American petroleum institute

۹۴۷ سانتیمتر مکعب (۱/۴ گالن) دوغاب از قیف به دست می‌آید. در اروپا گرانروی بر حسب زمان عبور ۱۰۰۰ سانتیمتر مکعب در قیف مارش که قطر سوراخ آن ۵ میلی‌متر است محاسبه می‌شود. گرانروی آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد مطابق مخروط استاندارد API برابر ۲۷ ثانیه و باروش اروپایی ۲۹ ثانیه است. دوغابهای با گرانروی تا ۶۰ ثانیه را تا فاصله محدودی می‌توان پمپاژ کرد. گرانروی مارش ترکیبی از  $\tau_0$  و  $\eta$  معادله ۳-۴ دوغاب پایدار را ارائه می‌دهد.

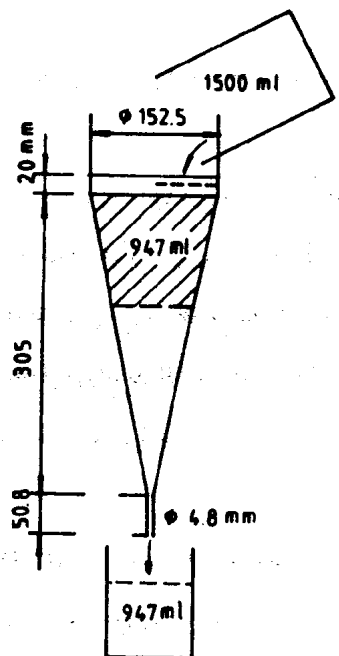


ب - نمودار گرانروی



الف - گرانروی سنج استورمر

شکل ۱۲ - اندازه‌گیری گرانروی دوغاب



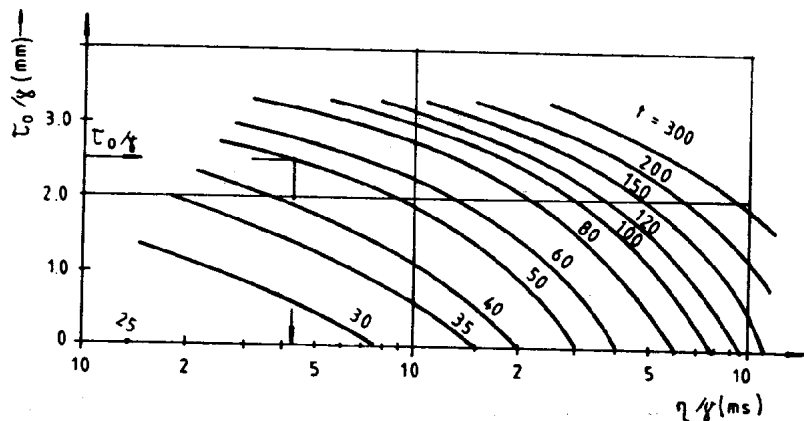
شکل ۱۳ - قیف مارش (بر اساس API برای اندازه‌گیری گرانروی)

برای اینکه اندازه‌گیری هردو پارامتر گرانروی در آزمایشگاه کارگاه ساده شود لمباردی<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) روشی برای اندازه‌گیری مقاومت آستانه‌ای ابداع کرد که شامل فرورودن صفحه فلزی نازک و خشدار با شیارهایی به عمق چند میکرون در داخل دوغاب است. ابعاد این صفحه  $1/5 \times 100 \times 100$  میلیمتر است. سپس این صفحه را بیرون می‌آورند و به حالت معلق نگاه می‌دارند تا چکیدن قطرات دوغاب متوقف شود. بعد از آن این صفحه را وزن می‌کنند. از اختلاف وزن  $\Delta W$  بین صفحه خشک و صفحه با دوغاب چسبیده، مقاومت آستانه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_0 = \frac{\Delta W}{2A} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (V)$$

که در آن  $A$  مساحت صفحه است.

لومباردی همبستگی خوبی بین مقدار  $\tau_0$  اندازه‌گیری شده با این روش و گرانروی سنج استورمر به دست آورده است. با تعیین  $\tau_0$ ، مقدار  $\eta$  با زمان  $t$  اندازه‌گیری شده با قیف مارش با استفاده از نمودار رسم شده در شکل شماره ۱۴ به دست می‌آید:



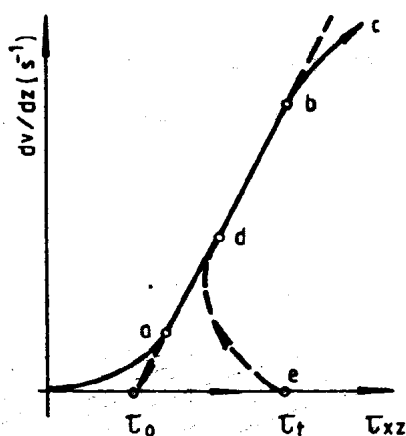
شکل ۱۴ - رابطه بین پارامتر  $\tau_0$  و گرانروی و زمان  $t$  قیف مارش

### ۳-۳-۳ تیکسوتروپی دوغابها

زل شدن مخلوط دوغاب سیمان و بتونیت را در حالت سکون، تیکسوتروپی می‌گویند. خاصیت تیکسوتروپی در اثر نیروهای الکتروشیمیایی میان ذرات معلق با بار الکتریکی ایجاد می‌شود. دوغاب در حالت سکون، برای مجموعه ذرات معلق مقاومت ایجاد می‌کند. این فرایند برگشت‌پذیر است؛ یعنی: اگر دوغاب به حرکت درآید، اتصال میان ذرات شکسته شده و دوغاب روان می‌شود و اگر دوغاب به حال سکون رها شود، دوباره زل تشکیل می‌شود. این



فرآیند در شکل شماره ۱۵ به صورت نمودار نشان داده شده است. مقاومت سیال بینگهام در امتداد خط  $ab$  (که در آن جریان سیال آرام است) و  $b$  تا  $c$  (که جریان مغشوش است) افزایش می‌یابد. وقتی که دوغاب برای مدتی به حالت سکون قرار گیرد، مقاومت آستانه‌ای  $\tau_0$  به  $\tau_t$  افزایش می‌یابد و وقتی که به حرکت درآید به مقدار اولیه  $\tau_0$  کاهش می‌یابد و دوباره روان می‌شود. مقدار  $\tau_0$  دوغاب کمترین تنشی است که باید اعمال شود تا جریان آرام سیال آغاز شود. به این ترتیب مقدار  $\tau_0$  در تعیین حداقل فشار لازم برای تزریق دوغاب به کار می‌رود. مقاومت تیکسوتروپی را با گرانروی سنج استورمر اندازه‌گیری می‌کنند. برای این منظور ابتدا خط  $abc$  با افزایش سرعت دورانی به دست می‌آید و بعد از اینکه دوغاب به حالت سکون قرار گرفت، خط  $edc$  رسم می‌شود (شکل شماره ۱۵).

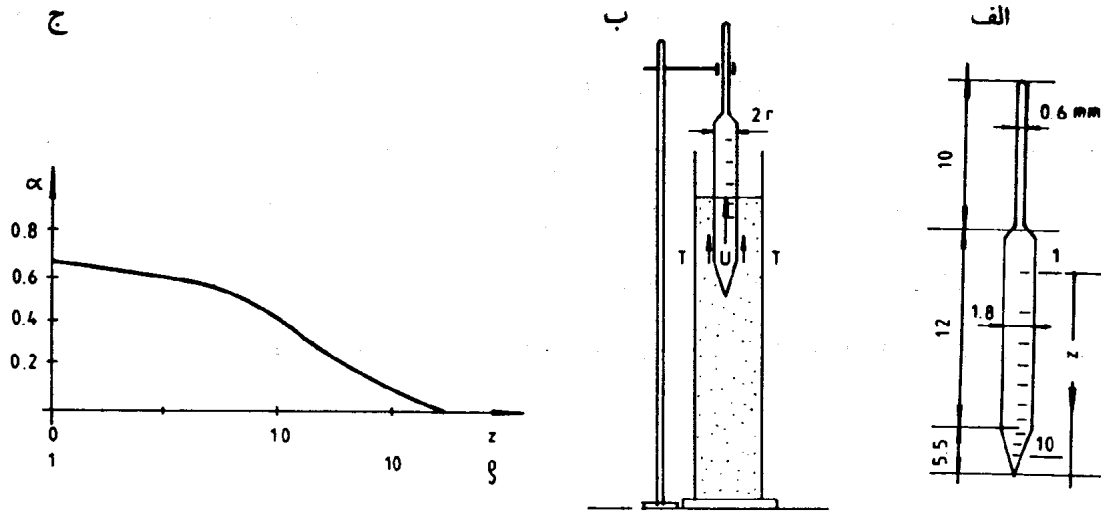


شکل ۱۵ - خواص رئولوژی دوغابهای تیکسوتروپی

مقاومت تیکسوتروپی  $\tau_t$  با افزایش زمان افزایش می‌یابد و آزمایش باید متوالیاً بعد از زمانهای طولانی و در حالت سکون تکرار شود تا مقاومت نهایی  $\tau_t$  به دست آید. برای مقاصد عملی نان ویلر<sup>۱</sup> با استفاده از طراحی هیدرومتر مدرج برای اندازه‌گیری چگالیهای ۱ تا ۲۰ گرم بر سانتیمتر مکعب در کارگاه تزریق، مطابق شکل شماره ۱۶ (الف و ب) آزمایش ساده‌تری ابداع کرده است. وقتی که هیدرومتر در دوغاب با گرانروی زیاد شناور می‌شود، علاوه بر فشار رو به بالا که بر سطح غوطه‌ور  $A$  اثر می‌کند، نیروی مقاوم گرانروی  $\tau = \tau_0 \cdot A$  نیز عمل می‌کند به طوری که هیدرومتر در عمقی به حالت سکون می‌رسد که در جبه‌بندی هیدرومتر با چگالی  $\rho_a$  مشخص شده است و این چگالی بزرگتر از چگالی حقیقی  $\rho$  ترکیب دوغاب است. از پارامترهای معلوم (سطح  $A$  و حجم  $V$ )، مقاومت آستانه‌ای دوغاب محاسبه می‌شود:

$$\tau_0 = \frac{V_g (\rho_a - \rho)}{A} = 0.5 \alpha r g (\rho_a - \rho) \quad (8)$$

که در آن شعاع هیدرومتر و  $\alpha$  مشخصه هیدرومتر مطابق شکل شماره ۱۶-ج است:



الف - ابعاد هیدرومتر      ب - تعادل نیروها در هیدرومتر      ج - مشخصه  $\alpha$  هیدرومتر

شکل ۱۶- اندازه گیری تیکسوتروپی به وسیله هیدرومتر

هیدرومتر را باید خیلی به آهستگی داخل دوغاب فرو برد به طوری که گرادیان سرعت در سطح آن کم باشد. نسبت بین چگالی  $\rho_a$  و  $\rho$  به نام نسبت چگالی گرانی خوانده می شود و با  $R$  نشان داده می شود:

$$R = \frac{\rho_a}{\rho} \quad (9)$$

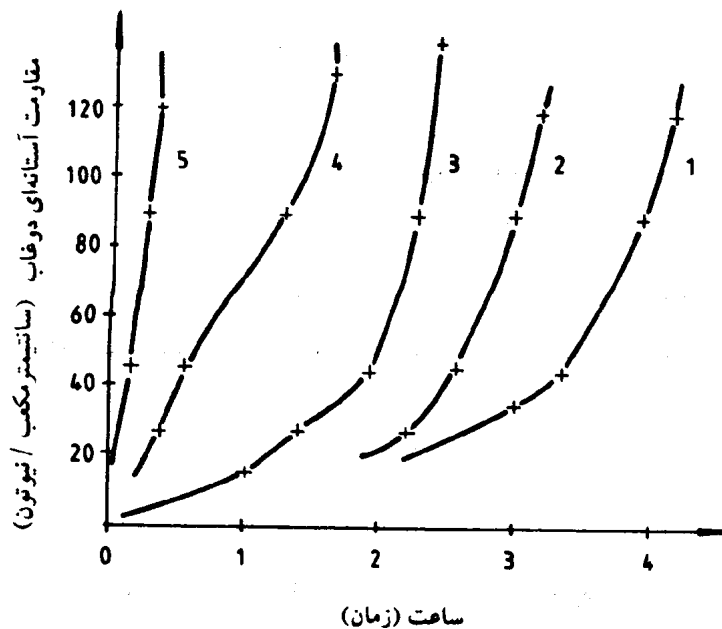
آزمایش نشان داده است که دوغاب با  $R > 2$  خاصیت تیکسوتروپی دارد. این آزمایش چگالی سنجی، ابزار باارزشی برای اندازه گیری گرانی و تیکسوتروپی و برای بررسی کیفیت دوغاب در پروژه تزریق است.

### ۴-۳ خواص فیزیکی دوغابهای تزریق شده

#### ۱-۴-۳ کسب مقاومت دوغاب تزریق شده

در تعدادی از پروژهها، مقاومت دوغاب تزریق شده در طول زمان به کمک آزمایش ویکات تعیین می شود. چنین وضعی به دو دلیل توصیه نمی شود. اول اینکه آزمایش ویکات فقط استاندارد برای تعیین بعضی از مشخصات

سیمان است که بر روی نمونه‌هایی با مشخصات استاندارد انجام می‌گیرد. دلیل دوم اینکه آب از دوغاب تزریق شده جدا می‌شود و دوغاب در شکافها با غلظتی که بیشتر از غلظت دوغاب اولیه است می‌بندد. این وضعیت، بدون هیچ‌گونه افزایش مقاومت در اثر واکنش هیدروشیمی سیمان که به گیرش موسوم است، مقاومت چسبندگی اولیه‌ای ایجاد می‌کند. وقتی که برای انتخاب بهترین ترکیب سیمان چندین گزینه وجود داشته باشد، ممکن است کسب مقاومت دوغاب را با ترکیب‌های مختلف که با نمونه‌های غلیظ به نسبت ۱ آب به ۸/۰ مواد تهیه شده است، مطالعه کرد و از چگالی سنجی که قبلاً توضیح داده شد و نیز پره<sup>۱</sup> آزمایشگاهی برای مقاومتی که از حدود تغییرات چگالی سنج بیشتر است، استفاده کرد. در شکل شماره ۱۷ نتایج چنین آزمایشی برای پرده تزریق نشان داده شده است. به طوری که دیده می‌شود، مقاومت زیاد نهایی دوغاب تزریق شده در شکافها، برای دوام و ایمنی پرده تزریق ضروری نیست.



۱- C : ۱ W : ۱ CaCl<sub>2</sub> : ۳۲ W-۱ B : ۰/۰۵ : ۰/۰۱۵ C : ۱

۴- C : ۱ W : ۱ Na<sub>2</sub> CO<sub>3</sub> : ۰/۰۱۵ B : ۰/۰۱۵ : ۰/۰۳ C : ۱ Na<sub>2</sub> CO<sub>3</sub> : ۵ W-۱ B : ۰/۰۲ : ۰/۰۳ C : ۱

شکل ۱۷- افزایش مقاومت دوغابها

مقاومت برشی  $\tau_f$  مورد نیاز برای مقابله با نیروی ارتفاع هیدرولیکی  $\gamma_w \cdot h_p$  در شکل شماره ۱۸ که بر بالادست شکاف صفحه‌ای شکل به عرض  $\delta$  و طول  $L$  که با دوغاب پر شده عمل می‌کند، به صورت زیر است:

$$\frac{\tau_f}{F_s} = 0.5 h_p \cdot \gamma_w \frac{\delta}{L} \quad (10)$$

و در مورد شکافهای لوله‌ای شکل و به قطر  $\delta$  رابطه به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\tau_f}{F_s} = 0.25 h_p \cdot \gamma_w \frac{\delta}{L} \quad (11)$$

که در آن  $F_s$  ضریب ایمنی مورد نظر است. ضخامت  $L$  پرده تزریق معمولاً به نحوی است که رابطه زیر برقرار است:

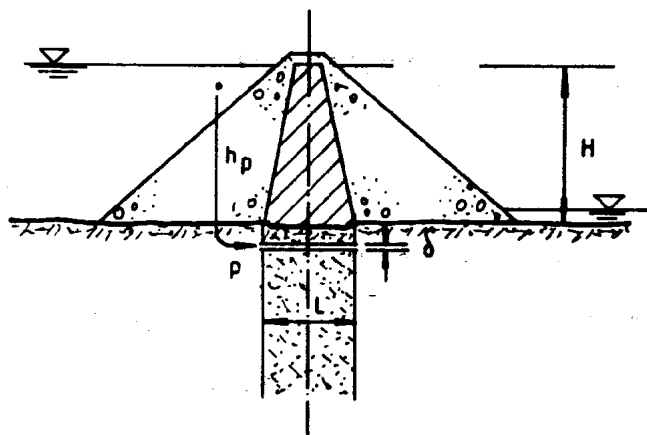
$$\frac{h_p}{L} < 1.0 \quad (12)$$

اگر ضریب ایمنی زیاد یعنی  $F_s = 1.0$  انتخاب شود، مقاومت برشی مورد نیاز دوغاب تزریق شده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_f = 500 \delta \frac{\text{KN}}{\text{m}} \quad (13) \quad \text{الف - در مورد شکافهای صفحه‌ای:}$$

$$\tau_f = 250 \delta \frac{\text{KN}}{\text{m}} \quad (14) \quad \text{ب - در مورد شکافهای لوله‌ای:}$$

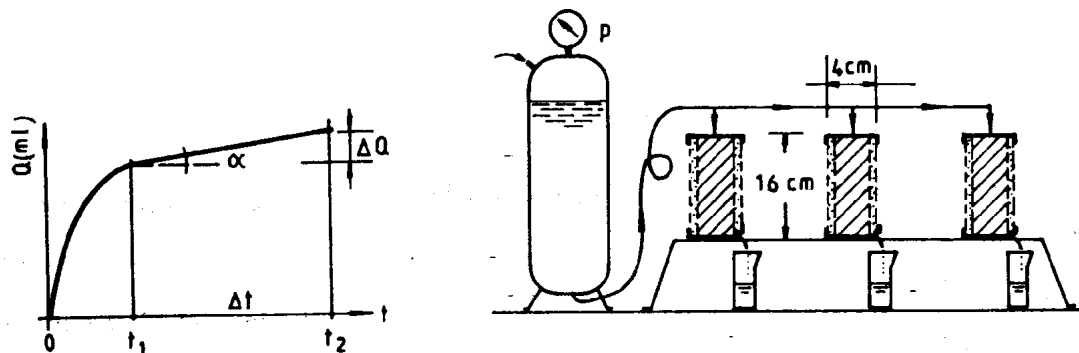
مقاومت برشی ۵۰ کیلوپاسکال برای انسداد شکافی به پهنای ۰/۱ متر که با دوغاب تزریق شده باشد، با وجودی که از مقاومت برشی دوغاب رس - سیمان کمتر است، ولی کفایت می‌کند.



شکل ۱۸ - شکاف افقی در پرده تزریق که با دوغاب پر شده است.

در تزریقهای تحکیمی پی سدهای بتنی مرتفع و یا اطراف تونلهای تحت فشار که هدف از تزریق، بهبود تغییر شکل پذیری زمین است باید از دوغاب با مقاومت بالا استفاده کرد. در چنین مواردی دوغاب تزریق شده پس از سخت شدن باید مدول تغییر شکل پذیری و مقاومت بالایی داشته باشد. بررسی مقاومت دوغاب تزریق شده در نمونه‌های حاصل از شکافهای تزریق شده به حالت برجا غیرممکن است و به این منظور باید آزمایشهای سیستماتیک در آزمایشگاه انجام گیرد. در این مورد، روشی توسط نانویلر ابداع شده است که در زیر به شرح آن پرداخته می‌شود:

برای اینکه مقاومت نمونه‌های آزمایشگاهی، معرف مقاومت دوغاب تزریق شده در شکاف باشد، نمونه‌هایی باید تهیه شوند که فرآیندی شبیه پرشدگی در داخل شکافها را طی کنند. براساس چنین شرطی، نمونه‌هایی از دوغاب تهیه می‌شوند. دستگاه تهیه همزمان چند نمونه (نمونه‌های مشابه) در شکل شماره ۱۹ نشان داده شده است.



ب - زمان در مقابل آب فیلتر شده،

{t} زمان تثبیت شدن جریان.

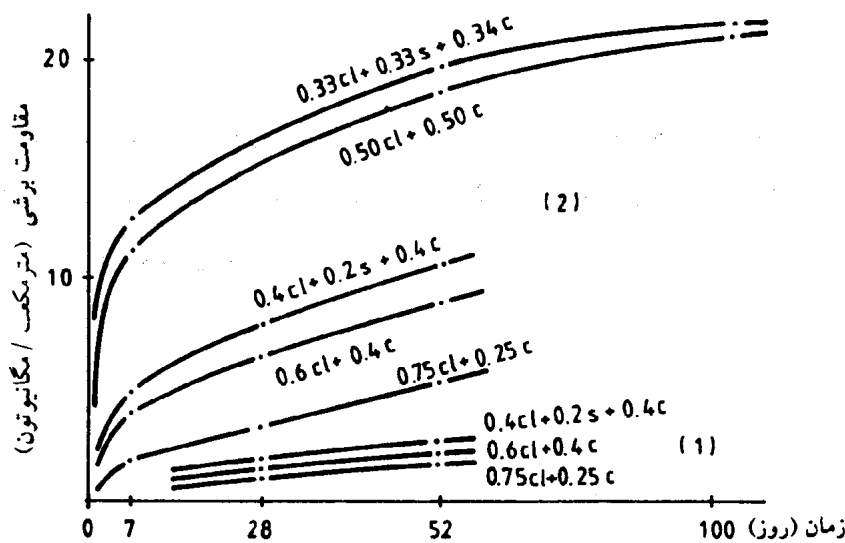
الف - آرایش آزمایش برای تهیه همزمان چند نمونه

شکل ۱۹- تهیه نمونه‌های دوغاب فیلتر شده

دستگاه شامل مخزنی از دوغاب و تعدادی قالب استوانه‌ای با پوشش داخلی نفوذپذیر است. در پوش قالبها به مخزن مرتبط است و آبی که از پوشش نفوذپذیر نشت می‌کند، در کف ظرفهای شیشه‌ای مدرج جمع می‌شود. قبل از بستن درپوشها، لوله‌ها و قالبها را از دوغاب مورد آزمایش پرمی‌کنند. با تزریق هوای فشرده، دوغاب به تدریج فشرده شده و آب آن خارج می‌شود. حجم آب خارج شده با دوغاب تازه جایگزین می‌شود. دوغاب درپوشش متخلخل غلیظ تر می‌شود و ضخامت آن افزایش می‌یابد تا به تعادل نهایی میان خواص دوغاب و فشار اعمال شده برسد و جریان آب خارج شده از دوغاب ثابت بماند. نمونه‌ها را برای مدت زمانی (حداقل ۳۰ دقیقه) در قالبها تحت فشار نگه می‌دارند،

سپس قالبها را پیاده و برای ۵۶، ۲۸، ۹ و ۹۰ روز مراقبت می‌کنند تا اینکه مقاومت فشاری نامحصور آنها مشخص شود. در شکل شماره ۲۰ مقاومت نامحصور نمونه‌ها و همچنین مقاومت بدون فیلتر شدن نشان داده شده است. مقاومت تمام نمونه‌ها حتی ۵۶ روز بعد از تهیه نیز افزایش می‌یابد. نمونه‌های فیلتر شده نسبت به نمونه‌های فیلتر نشده، مقاومت نامحصور زیادتری دارند و مقاومتشان به نسبت سیمانی که دارند، افزایش می‌یابد. باید اشاره کرد که چگالی نمونه‌هایی که به این طریق تهیه می‌شوند در طول مقطع یکنواخت نیست و همان‌طور که در شکل شماره ۲۱ نشان داده شده است، در پیرامون یعنی: جایی که گرادیان فشار فیلتر که باعث فشردن رسوب می‌شود افزون‌تر است، چگالی بیشترین مقدار را دارد و کمترین آن در مرکز است. بنابراین مقاومت و یا پارامترهای دیگر تعیین شده از آزمایش، مقادیر متوسطی هستند که به ترکیب دوغاب، قطر نمونه و شدت فشار اعمال شده بستگی دارند. همین پارامترها برای دوغاب تزریق شده در سنگ یعنی خواصی که با عرض شکافها نیز تغییر می‌کند به کار می‌رود.

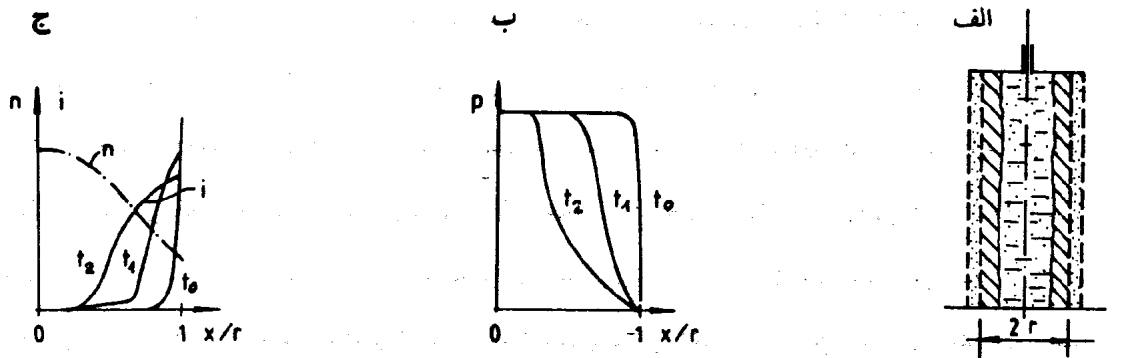
روش شرح داده شده برای مطالعات مقایسه‌ای دوغابهای با ترکیب مختلف به منظور انتخاب بهترین ترکیب دوغاب برای پروژه‌های خاص، بسیار مفید خواهد بود.



۲- نمونه‌های فیلتر شده همان دوغاب

۱- فیلتر نشده

شکل ۲۰- کسب مقاومت در طول زمان در نمونه‌های فیلتر شده و فیلتر نشده



$r =$  شعاع

$x =$  فاصله از محور

(ج) تسخّل و گرادیان در امتداد

(ب) توزیع فشار در امتداد شعاع در طول زمان

(الف) طرح کلی نمونه،

شعاع در زمانهای مختلف

شکل ۲۱ - افزایش ضخامت دوغاب در حین فیلتر شدن

### ۲-۴-۳ نفوذپذیری دوغابهای تزریق شده

نفوذپذیری متوسط دوغاب تزریق شده رامی توان از شیب قسمت پایدار شده منحنی شدت جریان - زمان که در شکل شماره ۱۹ نشان داده شده است به دست آورد. با انتگرال گیری جریان مایع در مسیرهای شعاعی و از مرکز به حد متخلخل، رابطه زیر به دست می آید:

$$K = \frac{q L_n r/r_0}{2\pi LP} \quad (15)$$

که در آن:

$r =$  شعاع تأثیر تزریق بر حسب سانتیمتر

$r_0 =$  نصف باز شدگی درز و شکاف بر حسب سانتیمتر

$p =$  فشار بر حسب سانتیمتر آب

$q =$  دبی بر حسب سانتیمتر مکعب در ثانیه

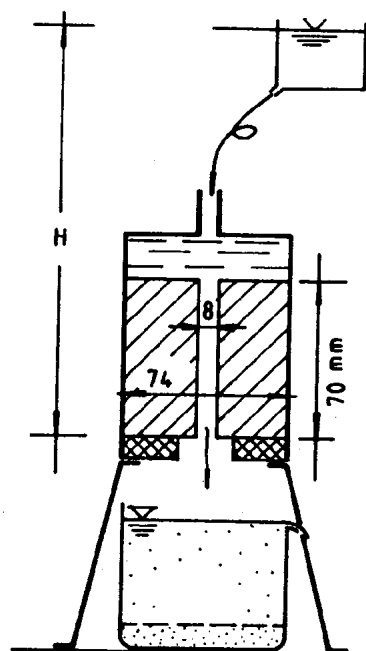
شعاع  $r_0$  را ممکن است از قانون پوآزوی حساب کرد، ولی تخمینی که  $r = 0.01 r_0$  و  $r = 0.001 r_0$  به دست

می دهد، حدود تغییرات ناچیزی بر  $K$  از  $K = \frac{0.73 q}{LP}$  تا  $K = \frac{1.1 q}{LP}$  می گذارد.

### ۳-۴-۳ مقاومت دوغاب تزریق شده در مقابل فرسایش

فرآیند جداسازی بعدی دانه‌ها از دوغاب تزریق شده، بر اثر تراوش آب در امتداد شکافهایی که کاملاً پر نشده‌اند به فرسایش موسوم است. وقتی که گرادیان خروجی به قدر کافی بزرگ باشد، ممکن است در محل خروج آب تراوش یافته از میان دوغاب تزریق شده نیز فرسایش اتفاق افتد. اگر مقاومت دوغاب کم باشد، ممکن است بعد از آب‌اندازی مخزن وقتی که دوغاب در شکافها کاملاً سخت شده باشد، فرسایش اتفاق افتد یا بلافاصله بعد از تزریق یک مرحله دوغاب، آب زیرزمینی بالا بیاید و سبب افزایش گرادیان فشار در ناحیه مورد بحث شود. در چنین مواردی، کسب مقاومت اولیه، در ارزیابی خطر فرسایش و انتخاب ترکیب بهینه دوغاب مؤثر است.

از نمونه‌های دوغابی که از دستگاه فیلتری نشان داده شده در شکل شماره ۱۹ تهیه شده است، مقاومت در مقابل فرسایش بررسی می‌شود. به این منظور، در مرکز نمونه گمانه‌ای به قطر ۸ میلیمتر مطابق شکل شماره ۲۲ حفر می‌شود. آب تحت فشار از میان گمانه با فشار و سرعت معین جریان می‌یابد. نمونه قبل و بعد از آزمایش به دقت وزن می‌شود و اختلاف وزن، مقدار مواد فرسایش یافته را که موسوم به پارامتر فرسایش است ارائه می‌دهد. بر حسب مورد، نمونه‌ها ممکن است بلافاصله پس از تهیه و بعد از دوره عمل‌آوری بررسی و آزمایش شوند. این آزمایش کمی نیست، بلکه نشانگر نتایجی است که با وجود این ممکن است برای انتخاب دوغابهای با ترکیبهای مختلف مفید باشد.



شکل ۲۲- نصب دستگاه برای آزمایش فرسایش مخلوط دوغاب



نتایج مندرج در جدول شماره ۳ نشانگر آن است که پارامتر فرسایش مخلوطهای با رس بیشتر، از مخلوطهای با سیمان بیشتر، کمتر است و این مسئله چنین تعبیر می‌شود که مقاومت دوغاب تزریق شده در مرحله اول، اساساً تابع چسبندگی است، نه مقاومتی که بعداً در اثر فرآیند هیدراسیون سیمان به دست می‌آید.

جدول ۳- پارامتر فرسایش (افت وزنی بعد از آزمایش)، نمونه بعد از ۶ ساعت با نسبت مواد ۱: آب ۱ آزمایش شده است (مدت آزمایش ۲۴ ساعت است).

محل پروژه	مخلوط	چگالی نسبی $\rho_a/cm^3$	درصدافت وزنی در سرعت آب ۳ m/s ۰/۷ m/s
Buvko Blato	۰/۲ C:۰/۴ CL:۴ S:1W	—	۲/۱
	۰/۴ C:۰/۴ CL:۰/۲ S:1W	—	۰/۹
	۰/۲ C:۰/۷۵ CL:۰/۰۵ B:1W	—	۰
	۰/۲۵ C:۰/۷۵ CL:1W	—	۰
Meifedown	۰/۵ C:۰/۵ CL:1W	۳/۵ <	۱۴/۳
	۰/۲۵:۰/۷۵ CL:1W	۵ <	۵/۷
Granvarevo	۱ C:۱ W	—	۰/۴
	۰/۳۵ C:۰/۶۵ CL:۱ W	—	۰

### ۳-۴-۴ مقاومت دوغاب در مقابل فساد شیمیایی

هنگامی که آب زیرزمینی یا آب نگهداری شده در محل سد برای سیمان از نظر شیمیایی مخرب باشد، دوغاب باید طوری انتخاب شود که در مقابل تجزیه شیمیایی و تأثیرات درازمدت آب مقاومت کند و این‌گونه آب، مقاومت دوغاب را کاهش می‌دهد و فرسایش پذیری یا حل شدن بخشی از اجزای دوغاب را سبب می‌شود. هرچند نفوذپذیری اغلب دوغابها کم است، ولی تراوش حتی در سرعت خیلی پایین باعث زوال اساسی دوغاب بعد از دوره طولانی می‌شود که کارایی پرده تزریق را کاهش می‌دهد. بدتر از آن اینکه آب تراوش یافته از میان شکافهای کاملاً پرنشده ممکن است دوغاب سخت شده را با شدت بیشتر تخریب کند و باعث آسیب دیدن عملیات تزریق در کوتاه مدت شود. در چنین مواردی باید دوغابهای مقاوم در مقابل عوامل شیمیایی ساخته شود. وقتی که ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی و آبی که دریاچه را پر می‌کند مشکوک باشد، باید اثر تخریبی این آب بر اجزای دوغاب بررسی شود.

عوامل مخرب عبارتند از:

- سولفات‌ها که به کلسیم سیمان آسیب می‌رسانند.
- دی‌اکسیدکربن که آهک آزاد سیمان و کانیهای کلسیت بعضی ماسه‌ها را حل می‌کند.
- اسیدهای هوموس
- آب خیلی شیرین<sup>۱</sup> که املاح کلسیت را حل می‌کند.

بر اساس استانداردهای آزمایشگاهی، برای آزمایش تأثیر آب مخرب در ملات سیمان، ضروری است که نمونه‌های ملات با ترکیبهای مختلف وزن شده و در آب مخرب برای مدت چند ماه غوطه‌ور نگهداشته شوند. این نمونه‌ها پس از خشک شدن توزین می‌شود و با چشم برای تشخیص یکپارچگی و به وجود آمدن شکاف بازرسی شده و سپس مقاومت آنها اندازه‌گیری می‌شود. بر این اساس، نمونه‌های با بیشترین مقاومت در مقابل آب مخرب انتخاب می‌شوند. این روش به علت اینکه آب در آغاز فقط در سطح نمونه‌های نسبتاً نفوذناپذیر عمل می‌کند خیلی بطنی است.

پس از گیرش و سخت شدن نمونه‌ها تحت شرایط مورد نظر و برای زمان معینی که ممکن است با شرایط واقعی همانند باشد، نتایج مقایسه‌ای مقاومت شیمیایی اجزای دوغاب ممکن است به دست آید. نمونه‌ها بعداً آسیاب و تبدیل به پودر نرم شده و در آب مخرب ریخته می‌شوند. در چنین آزمایشهایی، سطح فعال نمونه فوق‌العاده بزرگ شده و نتایج مورد نظر فقط در عرض چند روز به دست می‌آید.

پارامتر مقاومت در مقابل آب مخرب به صورت زیر است:

$$A = \frac{1}{K\varepsilon} \quad (16)$$

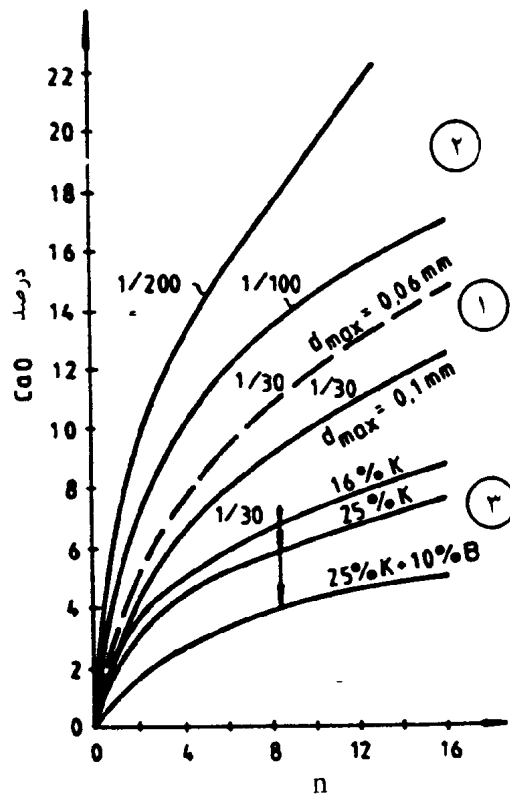
که در آن  $K$  ضریب تراوایی دوغاب تزریق شده است که به هنگام تهیه نمونه‌های فیلتر شده (معادله ۱۵) از نشت اندازه‌گیری می‌شود و  $\varepsilon$  نسبت نمکها بر حسب ppm بر گرم میزان حل شده از نمونه است که از آزمایشهای انحلال در نمونه آزمایشی تعیین می‌شود.

برای آزمایش، نمونه‌های مخلوط به مدت ۲۴ ساعت رها می‌شوند تا گیرش آنها انجام گیرد. سپس آنها را به مدت ۲۴ ساعت دیگر در اتوکلاو (کوره) قرار می‌دهند تا سخت شوند. نمونه‌ها را در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد خشک می‌کنند و پس از آسیاب کردن، از الک ۰/۱ میلیمتر عبور می‌دهند. پودر نمونه‌ها را در ظرف آزمایشگاهی با آب مخرب به نسبت ۱ گرم در ۳۰ سانتیمتر مکعب مخلوط و برای مدت یک ساعت رها می‌کنند. سپس مقدار املاح حل

---

1- Very soft water

شده را از طریق تیتراسیون (حجم سنجی) به دست می آورند. این عمل برای ۱۵ تا ۲۰ بار با همان نمونه و آب تازه تکرار می شود تا اینکه املاح محلول قابل اغماض باشند. مقدار کل املاح محلول نمونه بر حسب ppm برگرم بیان می شوند. این آزمایشها به منظور تعیین مناسبترین ترکیب دوغاب برای پرده تزریق سد قدیمی بنایی آسوان بر روی رودخانه نیل انجام شده است. این سد در سال ۱۹۰۰ به صورت سد وزنی و بنایی از گرانیت ساخته شده است که در آن خوردگی شیمیایی شدید ملات سیمان انجام گرفته و از مقاومت ساختمانی آن کاسته شده و تراوایی آن پیوسته افزایش یافته است. برای پرده تزریق آن باید دوغابی تزریق می شد که در مقابل فروشویی<sup>۱</sup> CaO با آب خیلی سبک رودخانه نیل مقاومت کند. آزمایش فروشویی با مخلوطهای دوغاب سیمان با افزودن کیزلگور<sup>۲</sup> و بنتونیت انجام شده است. نتایج آزمایش در شکل شماره ۲۳ دیده می شود. با بررسی تأثیر نسبت آبی که نمونه در آن قرار می گیرد، تصمیم گرفته شد که آزمایش با غلظت ۱ گرم نمونه در ۳۰ گرم آب انجام گیرد. این آزمایش ۳۰ بار تکرار شد. آزمایشهای دوغاب با کیزلگور و افزودن اندکی بنتونیت، نتیجه جالبی داده است که طی آن بیشترین مقاومت در مقابل خوردگی از نمونه حاوی مقداری بنتونیت به دست آمده است، زیرا بنتونیت مستقیماً با آهک آزاد در دوغاب سیمان واکنش نشان نمی دهد.



۱- تأثیر اندازه حداکثر دانه پودر، ۲- تأثیر غلظت پودر معلق، ۳- تأثیر افزودن کیزلگور، CaO فروشویی شده در درصد وزنی

سیمان، کیزلگور (K)، بنتونیت (B)، دفعات آزمایش (n)

شکل ۲۳- خوردگی شیمیایی مخلوط دوغاب

### ۳-۴-۵ پایداری حجم دوغاب تزریق شده:

وقتی که از مصرف دوغاب، با نسبت زیاد رس صحبت می‌شود، اغلب ایراد می‌گیرند که دوغاب تزریق شده ممکن است در شکافها منقبض شود و بنابراین ناحیه تزریق شده، دوباره تراوا و غیر مؤثر شود. در بررسیهای آزمایشگاهی نشان داده شده است که چنین ایرادی به دو دلیل وارد نیست:

الف- چگالی دوغاب تزریقی در شکافها با فشار اشباع اعمال شده خیلی افزایش می‌یابد.  
ب- دوغاب تزریق شده در خاک مستمراً در محیط مرطوب یا زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد به طوری که آب نمی‌تواند تبخیر شده و باعث انقباض حجمی شود.

انقباض خطی در آزمایشگاه، در نمونه‌ای که با دوغاب آب  $\frac{1}{6}^\circ$  تهیه شده و در قالب  $4 \times 4 \times 6$  سانتیمتر ریخته شده است، اندازه‌گیری می‌شود. در انتهای نمونه‌ها، نشانه‌هایی برای تعیین فاصله اولیه  $L_0$  تعبیه می‌کنند. برای اینکه نمونه‌ها عمل آورده شوند، آنها را مدتی در محیط اشباع یا غوطه‌ور در آب رها می‌کنند. فاصله بین نشانه‌ها دوباره اندازه‌گیری می‌شود. انقباض خطی بر حسب درصد طول نمونه‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{100(L_o - L_m)}{L} \quad (17)$$

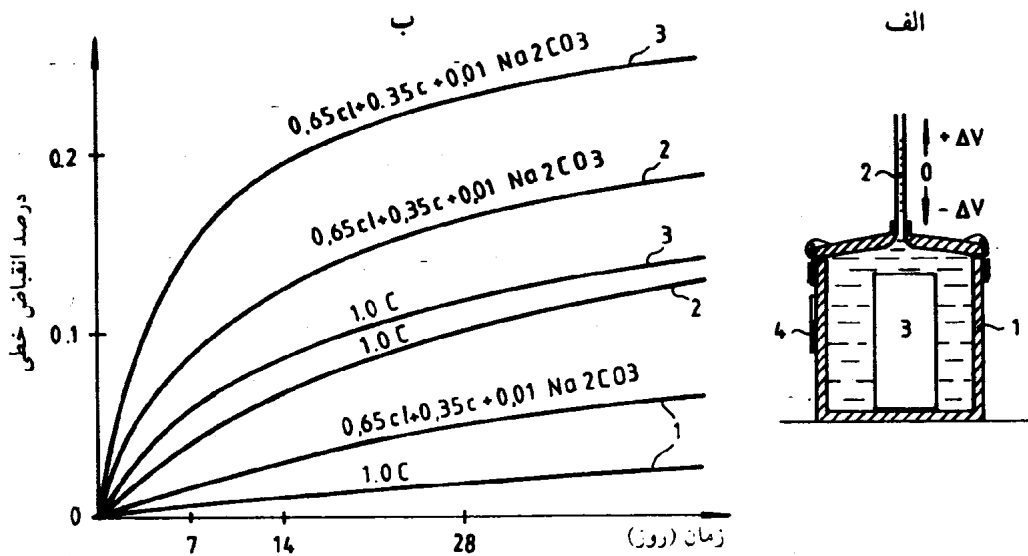
این روش دقیق نیست و تغییرات حجم را از شروع گیرش سیمان در بر نمی‌گیرد.

اگر تغییر حجم نمونه‌های استوانه‌ای تعیین شود، ممکن است بهسازی نیز انجام گیرد. نمونه‌ها، بلافاصله در پیکنومتر مخصوصی که در شکل شماره ۲۴-الف نشان داده شده است در دمای در حین آزمایش نگهداری می‌شوند. اختلاف حجم  $\Delta V$  در لوله شیشه‌ای باریک مدرج به دقت قرائت می‌شود و درصد انقباض حجمی بر حسب حجم اولیه  $V_0$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\phi_0 = \frac{100\Delta V}{V_0} \quad (18)$$

در شکل شماره ۲۴-ب انقباض خطی اندازه‌گیری شده دوغابهای با ترکیبهای مختلف برای پرده تزریق سد گرانچارو<sup>۱</sup> نشان داده شده است. تمام نمونه‌های مورد آزمایش، انقباض منحنی ارائه می‌دهند؛ یعنی: مقدار تورم در نمونه‌هایی که رس بیشتری دارند، مشخصتر از نمونه‌هایی است که از فیلتر شدن دوغاب به دست آمده‌اند. چنین روندی در تمام آزمایشهایی که تاکنون انجام شده، مشاهده شده است.

1- Granvarevo



الف- پیکنومتر برای اندازه‌گیری تغییرات حجم نمونه‌های دوغاب فیلتر شده (۱) ظرف بسته پر از آب (۲) لوله مدرج (۳) نمونه (۴) دماسنج

ب - درصد آدرشکلی خطی نمونه‌های مخطوط دوغاب

شکل ۲۴- انقباض خطی اندازه‌گیری شده دوغابهای با ترکیبهای مختلف برای پرده تزریق سد گرانچارو<sup>۱</sup>

### ۵-۳ محلولها و رزینها<sup>۲</sup>

محلولها و رزینها، ترکیبهای شیمیایی هستند که در زمین تزریق می‌شوند و ژلهایی می‌دهند که منافذ را پر می‌کنند. بنابراین تراوایی را کاهش داده و تا حدی مقاومت ناحیه تزریق شده را افزایش می‌دهند. انتخاب چنین ترکیبی، برای کار تزریق ویژه به مشخصاتی نظیر: دوام، گرانروی، مقاومت، کنترل قابل اعتماد ژل شدن، سمیت و هزینه بستگی دارد.

دوام ژلی که در حفره‌ها تشکیل شده است به ترکیب و واکنش شیمیایی احتمالی با بعضی املاح محلول در آب زیرزمینی بستگی دارد. از آنجاکه ژلهای دارای مقدار زیادی آب هستند، وقتی که در ناحیه بالای سطح ایستابی در معرض خشک شدن قرار می‌گیرند منقبض می‌شوند. تراوش آب جمع شده از میان ناحیه‌هایی که به‌طور کامل آبنبدی نشده‌اند و یا در حدود خارجی آنها هستند، مقداری از اجزای بدون پیوند شیمیایی ژل را فروشویی می‌کند که این عمل به آهستگی خواص اولیه ژل را تخریب می‌کند.

1 - Granvarevo

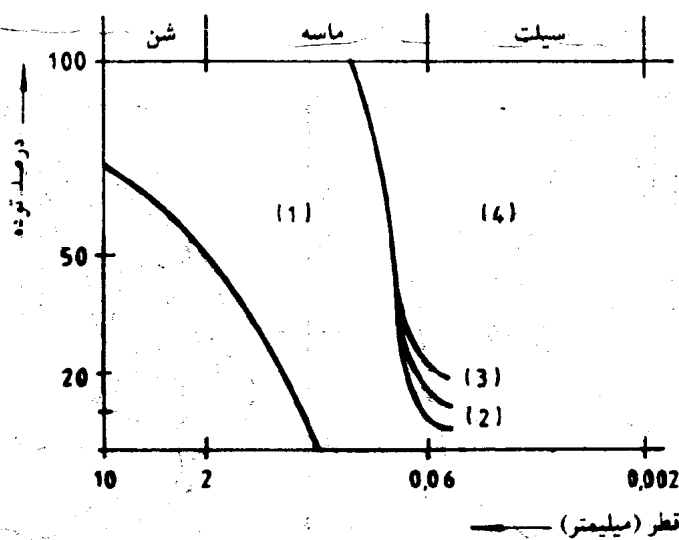
2- Resin

نفوذ ترکیبهای شیمیایی به داخل خاک به گرانروی آنها بستگی دارد. وابستگی بین گرانروی و تراوایی که در جدول شماره ۴ نشان داده شده، نسبتاً محافظه کارانه است و فقط جنبه راهنمایی دارد:

جدول ۴- وابستگی بین گرانروی ترکیبهای شیمیایی و تراوایی خاک قابل تزریق

حد تراوایی خاک K (cm/s)	گرانروی محلول یا رزین بر حسب سانتی پواز
$10^{-4}$	۲
$10^{-3}$	۵
$10^{-2}$	۱۰

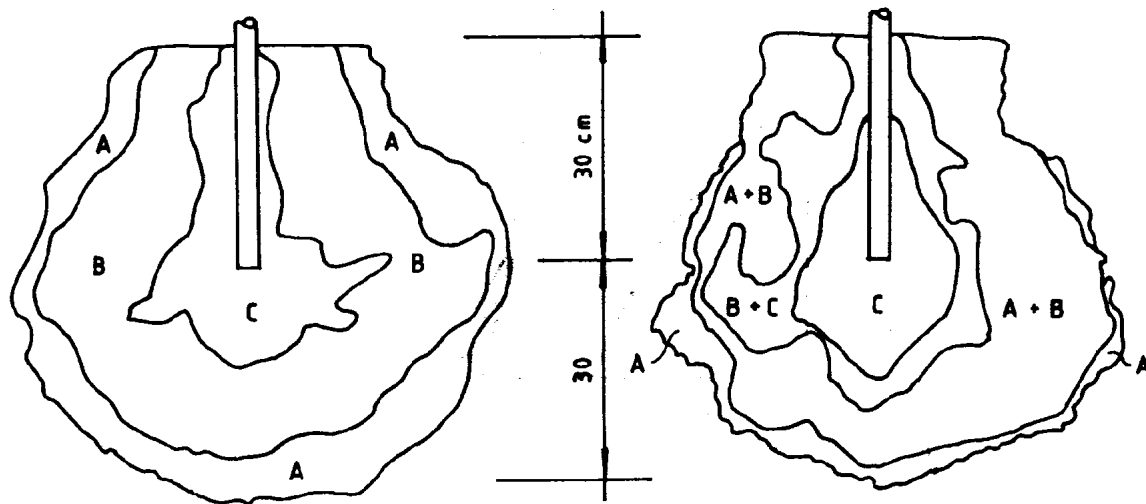
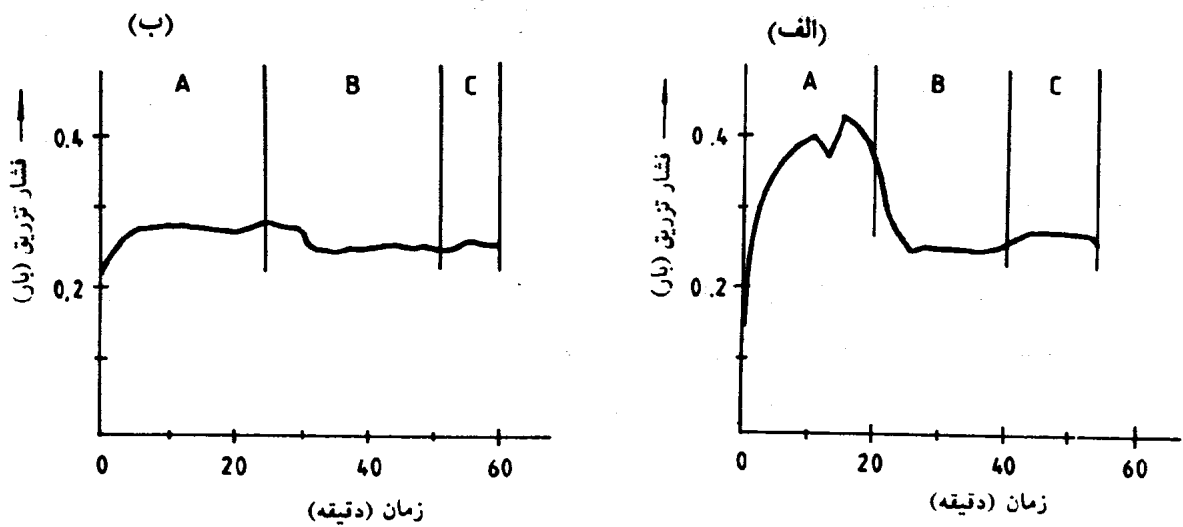
منحنیهای توزیع اندازه دانههای خاک ماسه‌ای قابل تزریق در شکل شماره ۲۵ نشان داده شده است. بدیهی است وجود سیلت ( $ml < 0.06$  دانه‌های) وضعیت را بحرانی می‌سازد و تزریق در خاکی که ۱۸٪ سیلت دارد، دشوار است و اگر خاک ۲۵٪ سیلت داشته باشد حتی با رزین هم نمی‌توان تزریق کرد.



(۱) خوب، (۲) مشکل؛ (۳) مشکل - نامناسب، (۴) نامناسب

شکل ۲۵- منحنیهای توزیع اندازه دانههای خاکهای قابل تزریق

بالات<sup>۱</sup> و کریش<sup>۲</sup> (۱۹۸۲) به منظور تعیین طرز کار (راهکار)<sup>۳</sup> نفوذ محلول دوغاب سیلیکات آزمایشهایی در ابعاد  $60 \times 60 \times 60$  که لوله‌ای در مرکز آن نصب شده بود، انجام داده‌اند. مکعب با سه لایه ماسه دانه درشت متراکم، با مقدار ناچیزی از ماسه دانه متوسط و ریز و مقداری شن ریز دانه پر می‌شود که یکنواختی ماسه  $C_{11} = 5$  و جرم ویژه خشک  $P_d = 1/9 \text{ g/Cm}^3$  و ضریب تراوایی  $K = 1/4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  است. در مدل اول که در شکل شماره ۲۶-الف نشان داده شده است، محلول سیلیکات سدیم با زمان ژل شدن  $7/5$  دقیقه به داخل ماسه خشک تزریق شده است. به هنگام تزریق، محلولهای رنگی مختلف که در شکل با A و B و C مشخص شده، به کار رفته است و فشار اعمال شده تزریق



(ب) در ماسه اشباع

الف - تزریق، زمان و رنگهای تزریق شده در ماسه خشک

شکل ۲۶- منحنیهای تراز نفوذ دوغاب سیلیکات با رنگهای مختلف در بررسیهای آزمایشگاهی (الف) فشار

نیز نشان داده شده است. در آزمایش دوم همان روش به کار رفته ولی ماسه اشباع نشده و زمان ژل شدگی ترکیب تزریق شده ۲۲ دقیقه بوده است. بعد از اینکه فرآیند ژل شدن کامل شد، مکعب از وسط بریده شده است، ناحیه‌های پر شده با دوغاب رنگهای متفاوت به طور متوالی دیده می‌شوند. نتایج در قسمت پایین شکل شماره ۲۶-الف و ب دیده می‌شود. جالب است یادآوری شود که توزیع دوغاب با کوتاهترین زمان ژل شدن برای تزریق مکعبی که شامل ماسه خشک بوده، در سرتاسر ناحیه تزریق شده نسبتاً نامنظم بوده و ترکیبها با یکدیگر مخلوط شده است. ترکیب تزریق شده در ماسه اشباع که در آن، ترکیب با بیشترین زمان ژل شدن تزریق شده است، در سرتاسر ناحیه تزریق شده توزیع نسبتاً منظم دارد و قسمتهای متوالی با یکدیگر مخلوط نشده است. این موضوع نشان می‌دهد که ژل شدن ترکیبی که قبلاً تزریق شده است، از نفوذ بعدی دوغاب در خاک جلوگیری نمی‌کند. دوغاب تزریق شده بعدی به جلو رانده می‌شود و به داخل ترکیب قبلی نفوذ می‌کند و با آن مخلوط می‌شود. ترکیب در تزریق خاکی که از آب زیرزمینی اشباع شده است، رقیق می‌شود و زمان ژل شدگی آن افزایش می‌یابد و نفوذ به داخل خاک یکنواخت تر است. نتایج این بررسیها آزمایشگاهی، با تجربه عملی تأیید می‌شود؛ یعنی: بعد از ژل شدگی ترکیبی که قبلاً تزریق شده است، ترکیب به طور موثری به داخل خاک نفوذ می‌کند.

### ۳-۵-۲ مقاومت خاک پس از تزریق شیمیایی

مقاومت ژلهای شیمیایی تزریق در مقایسه با مقاومت سیمان تزریقی کم است؛ اما ساختار ژل به هم پیوسته در منافذ تزریق شده، یکپارچگی دانه‌ها را با مقداری هم‌چسبی تأمین می‌کند؛ حال آنکه مقاومت برشی بدون تغییر باقی می‌ماند؛ بنابراین کسب مقاومت ناحیه تزریق شده برای تنشهای کم، نسبتاً زیاد و برای بارهای اضافی زیاد، قابل اغماض است.

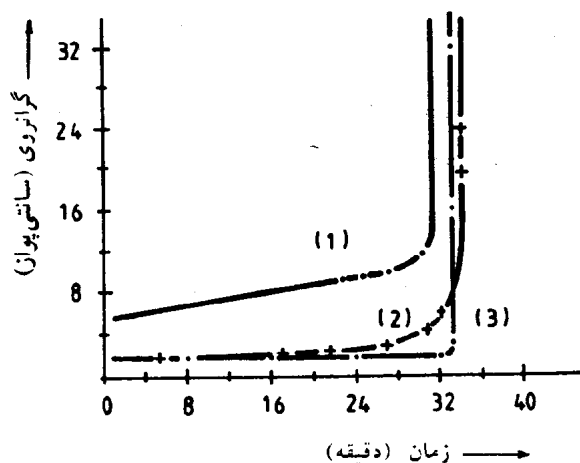
در آزمایشگاه، مقاومت خاک تزریق شده، در نمونه استوانه‌ای شکل آزمایش شده و به عنوان مقاومت نامحصور بیان می‌شود. چون بارها در سطح باعث ایجاد تغییرات تنش سه محوری در ناحیه بارگذاری می‌شوند؛ لذا نمونه‌های تزریق شده باید در آزمایش سه محوری بررسی شوند. قبل از آزمایش، تمام نمونه‌ها باید همانند وضع طبیعی، در آب غوطه‌ور شوند. مقاومت نمونه‌های خشک ممکن است تا ۱۰ برابر بیشتر از مقاومت نمونه‌های مرطوب باشد.

### ۳-۵-۳ زمان ژل شدن

زمان ژل شدن دوغاب شیمیایی بستگی به معرف انتخابی و غلظت محلول دارد. در چند ترکیب، افزایش گرانیروی تدریجی است؛ حال آنکه در مورد دوغاب شیمیایی وقتی که به مقاومت نهایی ژل برسد، گرانیروی دفعتهاً افزایش می‌یابد به طوری که زمان قابل استفاده برای پمپاژ تقریباً با زمان ژل شدن تطبیق می‌کند.



به عبارت دیگر، گرانروی تدریجاً افزایش می‌یابد به طوری که فقط قسمتی از زمان ژل شدن، برای پمپاژ قابل استفاده است. عوامل دیگری که بر زمان ژل شدن تأثیر می‌گذارند، اختلاف دمای محلول و زمین تزریق شده و رقیق شدن در حین تزریق است. بررسیهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که گرانروی محلول دو برابر گرانروی اولیه یعنی: قبل از شروع ژل شدن است و گرانروی رزینها تقریباً ثابت است و وقتی که تشکیل ژل آغاز می‌شود، گرانروی دفعتهً افزایش می‌یابد (شکل شماره ۲۷).



(۱) محلول سیلیکات (۵۰٪ سیلیکات، ۵٪ فرم امید، ۵٪ استات اتیل)

(۲) ۱۰٪ محلول اکریل آمید، (۳) AC ۴۰۰

شکل ۲۷ - تغییر گرانروی دوغابهای شیمیایی در طول زمان

### ۳-۵-۴ سمیت محلولهای شیمیایی

موضوع سمیت را از دو جنبه باید بررسی کرد: یکی مخاطره بهداشتی کسانی که با این مواد شیمیایی کار می‌کنند و دیگری مخاطره بهداشتی محیط زیست. بعضی از مواد شیمیایی که برای تزریق به کار می‌روند، ممکن است سمی، مخدر اعصاب، سرطانزا، سوزش آور پوست و خورنده باشند. در مورد مصرف مواد شیمیایی، رعایت اکید دستورالعمل تولید کننده ضروری است و محل کار باید مطلقاً تمیز نگهداشته شود. آب زیرزمینی ممکن است به آهستگی فروشویی کند و اجزای سمی ممکن است آب زیرزمینی را آلوده کند.

### ۳-۵-۵ جنبه‌های اقتصادی

قیمت مواد شیمیایی مختلف برای تزریق بین ۱ تا ۲۰ برابر تغییر می‌کند. هزینه تهیه مواد و تزریق ممکن است بین ۱

تا ۳ برابر برای مواد شیمیایی مختلف نوسان کند، به طوری که کل هزینه پروژه تزریق برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مناسبترین گزینه باید ارزیابی شود. در بعضی موارد، به منظور حل مشکلات ایجاد شده بر اثر آب زیرزمینی در مهندسی عمران، روشهای دیگری ممکن است مناسبتر از تزریق باشد.

مواد شیمیایی ایده‌آل برای تزریق باید دارای مشخصات زیر باشند:

- به صورت گرد محلول در آب باشد (برای کم کردن هزینه حمل حلال).
- نسبت به شرایط انبار کردن حساس نباشد.
- سمی، خورنده و منفجر شونده نباشد.
- محلول آن باید دارای گرانی کمی و در دمای عادی، پایدار باشد.
- مواد شیمیایی و راکتیوها و کاتالیزورهای مورد نیاز ارزان باشد.
- نسبت به کیفیت آب زیرزمینی حساس نباشد و باید در  $\text{PH} \geq 7$  پایدار باشد.
- ژل پایدار با مقاومت زیاد تشکیل دهد.

یک ماده شیمیایی مشخص، هرگز تمام این نیازها را برآورده نمی‌کند، ولی در هر مورد باید با توجه به شرایط موجود، مناسبترین آنها را انتخاب کرد.

طی سالهای ۱۹۶۰ - ۱۹۹۰ میلادی چند صد ماده شیمیایی برای تزریق ابداع شده، اما فقط چند تا از آنها به صورت تجارتي تکامل یافته است. در آمریکا، سیلیکات و اکریل آمید در ۹۰٪ پروژه‌ها به کار رفته‌اند و در بقیه موارد از ۶ محصول مختلف دیگر استفاده شده است.

برای تزریق شیمیایی، اغلب، محلولهای شیمیایی زیر به کار می‌روند:

سیلیکات سدیم، اکریل آمید، لیگنوسولفیت‌ها، فنوپلاستها و اینوپلاستها

### ۳-۵-۶ دوغابهای سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم (به نام شیشه آبی نیز نامیده می‌شود) به صورت مایع با وزن مخصوص (۳۸ Bé)  $1/36 \text{ gr/Cm}^3$   $\rho =$  فرمول شیمیایی  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $n\text{SiO}_2$  در صنعت به کار می‌رود. نسبت  $n = \frac{\text{سیلیس}}{\text{قلیایی}}$  بین ۳ تا ۷ تغییر می‌کند. وقتی که مقداری اسید یا نمکهای اسید به سیلیکات با حدود تغییرات  $n$  بین ۳ و ۴ اضافه شود، ژل مناسبی برای تزریق تشکیل می‌دهند. برای این منظور ممکن است بعضی از ترکیبات آلی مثل استات اتیل مخلوط با مقداری مواد شوینده (امتیازنامه فرانسه) یا فرم آمید با مقداری نمک (امتیازنامه آمریکا) K برای تنظیم زمان ژل به کار برد.

مقاومت ژل به مقدار سیلیس محلول بستگی دارد. برای رسیدن به مقاومت  $700 \frac{KN}{m^2}$ ، گرانروی  $10^6$  سانتی پواز یا بیشتر مورد نیاز است که این محلول به سختی قابل تزریق است. اگر فقط نفوذ ناپذیر کردن خاک بدون در نظر گرفتن مقاومت آن مطرح باشد، گرانروی محلول ممکن است تا ۳ سانتی پواز کاهش یابد. این گرانروی، گرانروی اولیه است و امکان دارد که در طول  $\frac{3}{4}$  زمان ژل شدگی دو برابر شود (شکل شماره ۲۷). بیشتر فرمولها را با ژلهای پایدار در زمین عنوان می‌کنند، اما این موضوع به دو دلیل مشکوک است. اولاً همه ژلهای سیلیسی آب خود را از دست می‌دهند و در حفره‌ها تزریق شده منقبض می‌شوند و بیشترین مقدار انقباض مربوط به کمترین مقدار گرانروی و کوتاهترین زمان ژل شدگی است. حفراتی که ابتدا کاملاً با ژل پر شده باشند، مقداری آب کسب می‌کنند و نفوذپذیری خاک تزریق شده را افزایش می‌دهند. سپس آب منطقه تراوش یافته نفوذ می‌کند و اجزای آزاد ژل را فروشویی می‌کند که باعث تضعیف و حتی تخریب کامل آن می‌شود.

سیلیکات سدیم سمی نیست و برای محیط زیست خطری ایجاد نمی‌کند؛ ولی بعضی از واکنش‌کننده‌ها<sup>۱</sup> ممکن است خطرناک باشند و در مورد دستورالعمل تولید کننده باید مورد توجه قرار گیرد.

### ۷-۵-۳ دوغابهای اکریل آمید

تاریخ جدید در تکنولوژی دوغاب شیمیایی با کشف AM-9 در آمریکا از سال ۱۹۵۱ شروع شده است؛ ولی از نظر تجارتي از ۱۹۵۳ در دسترس بوده است. AM-9 گد سفیدی است که شامل مخلوط دو منومر آلی بوده که ممکن است در درجه حرارت محدود به زنجیره‌های ملکولی طویل به وسیله چند درصد عامل پیوندی دو رگه پلیمر شود. محلولهایی که مواد جامد اولیه آن، ۲۰٪ باشد، دارای گرانروی کمتر از ۲ سانتی پواز است. ژل اساساً شامل آب (۸۰ تا ۹۷ درصد) است و در محیط مرطوب و آب پایدار است. وقتی که خشک شود منقبض شده و به ۱۰٪ حجم اولیه می‌رسد. اگر دوباره غوطه‌ور شود، باد می‌کند و به حجم اولیه می‌رسد. پرسولفات آمونیم معمولاً به عنوان کاتالیزور به کار می‌رود. اغلب تری اتانول امین<sup>۲</sup> به عنوان فعال کننده و فری سیانید پتاسیم به عنوان جلوگیری کننده برای بررسی زمان ژل شدن به کار می‌رود. محلول کاتالیزه، گرانروی اولیه خود را در زمان پیش درآمد تغییر نمی‌دهد، سپس ژل به طور ناگهانی همان طور که در شکل شماره ۲۷ دیده می‌شود سفت می‌شود. واکنش، حرارتزاست، بنابراین میزان افزایش مقاومت در نمونه‌های آزمایشگاهی بیشتر از زمین تزریق شده است. مقاومت نامحصور زمین متخلخل تزریق شده به مقدار ۳۵۰ تا ۱۴۵۰  $\frac{کیلو نیوتن}{متر مربع}$  می‌رسد، اما وقتی که تنش به  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{1}{4}$  این مقادیر می‌رسد خزش نسبتاً مشخص است. این ماده شیمیایی به شدت مخدر اعصاب است به طوری که در ۱۹۷۹ از تولید آن جلوگیری به عمل آمده است و در بازار محصول جدیدی به نام AC۴۰۰ جایگزین آن شده است که مخلوط منومرهای اکریل است. با افزودن

1- Reactant

2- Trietanolamine

عوامل پیوند و رگه، پلیمریزه می‌شود. این ماده شیمیایی سمی نیست و گرانی آن حدود ۲ سانتی‌پواز است و نفوذپذیری ژل آن حدود  $10^{-9}$  سانتیمتر<sup>۲</sup> ثانیه است. زمان پیش‌درآمد ممکن است به‌طور قابل اعتمادی کنترل شود و همه خواص دیگر آن شبیه به خواص AM-۹ است.

ژلهای اکریلی خیلی گراتر از ژلهای سیلیکات سدیم است و زمانی که گرانی کم و زمان پیش‌درآمد خوب کنترل شده، فاکتورهای مهمی برای موفقیت کار تزریق باشد به کار می‌روند.

### ۳-۵-۸ سایر دوغابهای شیمیایی

هر چند ۹۰٪ دوغابهای شیمیایی با دوغابهای سیلیکات سدیم و اکریلیک پی‌ریزی شده است با وجود این، باید به چند ترکیب دیگر نیز اشاره کرد.

دوغابهای لیگنو سولفونات بر مبنای محصولات زائد فرآیند چوب در صنعت کاغذسازی طراحی شده است. ترکیب آن با نوع چوب و فرآیند ساخت تغییر می‌کند. لیگنو سولفوناتها به حالت مایع یا به حالت گرد عرضه می‌شوند و ژل آنها با افزودن دی کرومات سدیم (خیلی سمی) تشکیل می‌شود. غلظت مایع مورد استفاده بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ گرم در لیتر است که گرانی آن بین ۳ تا ۸ سانتی‌پواز تغییر می‌کند و مقاومت ژل شبیه مقاومت به دست آمده از دوغاب اکریل امید است. این ژل اگر پیوسته غوطه‌ور باقی بماند، پایدار است. بر اثر فروشویی ممکن است دی کرومات سمی محیط زیست را آلوده سازد.

چند ترکیب دیگر نیز نظیر فنوپلاست، امینوپلاست و پلی یوریتان<sup>۱</sup> به ندرت برای تزریق در کارهای مهندسی عمران به کار می‌روند.

### ۳-۵-۹ کفها

کف، عبارت از امولسیون گازی حبابها در پلی یوریتان است. اندازه و ساختار حبابها با عامل مؤثر سطح<sup>۲</sup> کنترل می‌شود. قطر حبابها یکنواخت است و قطر حدود ۸۰٪ حبابها بین  $d/1$  و  $d/9$  تغییر می‌کند که  $d$  قطر متوسط است و به عامل مؤثر سطح به کار رفته بستگی دارد.

1- Polyurethane

2- Surface active agent

خاصیت مشخصه کف، قطر کم حبابها است. کف در رگاب و شکافها جریان می‌یابد تا اینکه فشار تزریق در فضاهای آزاد کاهش یابد که این امر باعث انبساط حبابها شده و دوغاب به علت کشش سطحی زیاد فاز مایع، سخت می‌شود. کفها با دو پارامتر دیگر مشخص می‌شوند.

الف - ضریب انبساط  $e$  که به عنوان نسبت بین حجم فازهای گازی معلق و مایع معلق گازی تعریف می‌شود.

$$e = \frac{V_g}{V_e} \quad (19)$$

ب - ضریب تورم  $f$  که نسبت حجم اولیه بر حجم نهایی کف است

$$f = \frac{V_e + V_g}{V_e} \quad (20)$$

که در آن  $V_e$  حجم فاز مایع معلق و  $V_g$  حجم فاز گازی معلق در فشار جو است. وقتی که  $e < 0.2$  باشد، اثر کفزیایی ناچیز است و زمانی که  $e > 0.8$  باشد، کف بلافاصله بعد از قطع فشار سخت می‌شود. کف با معلقهای سیمانی ممکن است به  $e = 3$  و کفهای آلی به مقدار  $e = 50$  برسد.

کفها به دو طریق تولید می‌شوند:

الف - با افزودن عوامل مؤثر سطحی به مخلوط

ب - با افزودن معرفهایی که تولید گاز به صورت حباب می‌کند.

با افزودن عوامل مؤثر سطح، بلافاصله بر روی مخلوط، حباب تولید می‌شود که اندازه آنها یکنواخت بوده و قطر آنها کمتر از ۱ میلی‌متر است. از نظر شیمیایی، عوامل واکنش‌زا برای انجام دادن واکنش به زمان ۱۰ تا ۲۰ دقیقه بسته به دمای موجود، نیاز دارند.

قطر حبابهای ایجاد شده یکنواخت و بزرگترین حبابها بیشتر از ۱ میلی‌متر قطر دارند. از ترکیب دو روش، دامنه تغییرات قطرهای حباب ممکن است افزایش یابد که بر خواص کف خصوصاً پایداری آن تأثیر می‌گذارد. کفها برای بستن فضاهای باز وسیع، غارها یا شکافهای وسیع با مصرف کم دوغاب، به ویژه وقتی که جریان آب وجود داشته باشد، خیلی مؤثرند. کف بلافاصله بعد از خروج از لوله تزریق، سفت می‌شود و نشست نمی‌کند و با آب نرم نمی‌شود و ممکن است همراه با تزریق بعدی سیمان غلیظ یا ملات به کار رود.

## ۴- منابع و مأخذ

۱-۴ معماریان، حسین ۱۳۷۴. زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.

۲-۴ پروفیسور نوئل ترجمه دکتر هرمز فامیلی، بتن‌شناسی (خواص بتن).

۳-۴ دکتر حسن رحیمی. مکانیک خاک.

4-4 Nonveiller, E., 1989. Grouting Theory and Practice. Elsevier, 1989.

Islamic Republic of Iran  
Plan and Budget Organization - Ministry of Energy

# **Guideline for grouting in hydro-structures**

No: 186

Office of the Deputy for Technical Affairs  
Bureau of Technical Affairs and Standards

1378/2000

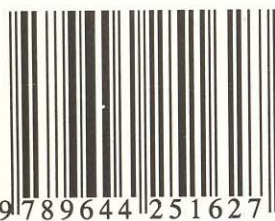
## این نشریه

با عنوان راهنمای تزریق در سازه‌های آبی تهیه شده است.

هدف از تهیه این نشریه معرفی مبانی تزریق در سازه‌های آبی است. تزریق در سازه‌های آبی مقاومت فیزیکی و مکانیکی آنها را افزایش داده و ضمناً از اتلاف آب نیز جلوگیری می‌کند. این نشریه برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر در پروژه‌های مهندسی آب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات

ISBN 964-425-162-8



9 789644 251627