

## تعیین اندازه بهینه ذرات سیمان جهت تزریق سیمانی در خاک

عباس مجدی

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مسعود ظهیری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۹/۷، تاریخ تصویب ۸۴/۳/۷)

### چکیده

تزریق فرآیند راندن و نهشته کردن ماده ای خارجی به درون خلل و فرج خاک و سنگ می باشد، به گونه ای که ویژگی های مهندسی خاک و سنگ مورد نظر برای سازگاری با اهداف کوتاه و بلند مدت مهندسی اصلاح گردد. تزریق در خاک برای افزایش مقاومت و یا جلوگیری از نشست خاک پی و نیز جهت ایجاد پرده آب بند به منظور جلوگیری از نشست های غیرمجاز به داخل تونل ها یا فضاهای زیرزمینی صورت می گیرد. اصولاً سیالی که تحت فشار تزریق می گردد مانند یک مایع ویسکوز در حفره ها و شکاف ها جریان می یابد تا اینکه عناصر بزرگتر مایع تزریق در شکاف ها بلوکه گردد، بنابراین مناسب بودن اندازه ذرات سیمان جهت نفوذ در خلل و فرج یک محیط متخلخل بسیار مهم است. برای طرح و بررسی این موضوع صرفاً به معادلات تجربی استناد می گردد، حال آنکه به منظور تحلیل روند تزریق در خاک دستیابی به روابط ریاضی ضروری می باشد. در این راستا با محاسبه قطر فضای خالی موثر بین ذرات خاک از طریق روابط ریاضی بدست آمده در این مقاله و تعمیم آن برای تعیین اندازه بهینه ذرات سیمان، رابطه ای حاصل گردیده که با مفروض دانستن شکل کروی برای ذرات خاک و سیمان چگونگی فرآیند تزریق را تبیین می نماید.

**واژه های کلیدی:** آمیزه تزریق، تزریق پذیری، فضای خالی موثر، سیمان، خاک

### مقدمه

معمولاً براساس خواص ژئوتکنیکی خاک ها خواص مایع تزریق باید مشخص شود، یکی از مهمترین خواص مایع تزریق نوع و اندازه دانه های سیمان بکار رفته در آمیزه تزریق می باشد. انتخاب مناسب اندازه سیمان در مایع تزریق به حدی مهم است که در صورت عدم انتخاب صحیح می تواند نتیجه عکس در عملیات تزریق داشته باشد. در واقع اگر برای خاک های دانه ریز از سیمان های دانه درشت و معمولی استفاده شود باعث کور شدن فضای خالی موجود بین ذرات خاک شده و خوردند تزریق به شدت کاهش می یابد، همچنین استفاده از سیمان های بسیار دانه ریز برای خاک های دانه درشت باعث افزایش هزینه تزریق تا چند برابر می شود. به این منظور تعیین نوع و اندازه سیمان در مایع تزریق خاک ها امری مهم و ضروری است و وجود یک رابطه بین اندازه ذرات خاک و سیمان موجود در مایع تزریق برای بهبود شرایط تزریق و طراحی عملیات تزریق لازم و ضروری می نماید.

تزریق در خاک به منظور پرکردن خلل و فرج و فضای خالی موجود در آن صورت می گیرد. نتیجه تاثیر تزریق ضمن تبدیل یک محیط متخلخل و ناپیوسته به یک محیط پیوسته موجب افزایش مقاومت و ظرفیت باربری، کاهش تغییرشکل پذیری و کاهش تراوایی خاک می گردد. تاثیر قابل توجه تزریق باعث شده که بسیاری از کارهای عمرانی که در گذشته قابل اجرا نبود، امروزه به سهولت توجیه اجرایی پیدا نماید.

عوامل موثر بر عملیات تزریق را می توان به سه دسته تقسیم نمود: (الف) عوامل زمین شناسی، که به پارامترهای ژئومکانیکی خاک از قبیل مقاومت، تخلخل، وزن مخصوص و درصد رطوبت بستگی دارد، (ب) عوامل فنی که مهمترین آن ها فشار تزریق می باشد و (ج) خواص مایع تزریق بکار رفته از قبیل دانه بندی مواد جامد موجود در مایع تزریق، گرانیروی، وزن مخصوص و چسبندگی و ...

## تاریخچه توسعه تزریق

با توجه به مفاهیم و دامنه کاربرد تزریق در کارهای عمرانی لازم است که مختصراً به تاریخچه شروع و توسعه تزریق اشاره شود. مخترع روش تزریق در کارهای عمرانی را شارلز برنی (Charles Berigny) یک مهندس عمران فرانسوی می دانند که در سال ۱۷۹۴ وارد دانشکده پلی تکنیک گردید و در سال ۱۸۰۲ برای جلوگیری از خسارات ناشی از شکست احتمالی دیواره های موج شکن بندر دیپ (Dippe) که در اثر جریان آب از زیر آن صورت می گرفت موضوع تزریق مواد در پی را مطرح نمود [۱]. کولین (Collin) در سال ۱۸۳۸ و بادمولین (Beaudemoulin) در سال ۱۸۳۹ از فرانسه و وارتن (Worthen) در سال ۱۸۴۵ در ایالات متحده آمریکا و کینیپل (Kinniple) در سال ۱۸۵۶ از انگلستان از دیگر افرادی بودند که مطالعات قابل توجهی در این زمینه انجام دادند [۱]. اولین پمپ هیدرولیکی تزریق و اولین فشار سنج جهت ثبت فشار لازم تزریق در سال ۱۹۱۰ ساخته شد [۱]. اولین گزارش کاربرد تزریق در یوگسلاوی در سال ۱۹۳۲ و در ساخت سد گروسنیکا ذکر گردید. از بین دیگر محققین پیشرو، لوژان (Lugeon) [۲] و لوفران (Lefronc) [۱] و ورشلف (Hvorslev) [۳] را می توان نام برد که تجربیات بسیار موثر و ماندگاری از خود بجا گذاشتند. از آن پس به علت گسترش فعالیت های عمرانی و بهره گیری بهینه از آن ها، تزریق بعنوان یک علم و هنر کاربردی و کارساز مورد توجه قرار گرفت. بطوریکه امروزه در مطالعات امکان سنجی و ارائه توجیه فنی و اقتصادی در طرح های عمرانی و معدنی، ارزیابی و بکارگیری تزریق و انواع مواد تزریقی جز لاینفک پروژه های عمرانی بوده و باید با دقت و حساسیت به آن نگریست.

## مروری بر روابط موجود برای تعیین معیار مناسب جهت اندازه مناسب سیمان در تزریق سیمانی خاک

یکی از مهمترین پارامترها در طراحی عملیات تزریق تعیین نوع و اندازه سیمان موجود در آمیزه تزریق است که ارتباط مستقیم با اندازه ذرات خاک و همچنین دانه بندی خاک دارد.

میچل (Mitchel) نسبتی را به نام نسبت تزریق پذیری تعریف کرد که بصورت زیر است [۴]:

$$GR = \frac{D_{15}}{d_{95}}$$

GR = نسبت تزریق پذیری خاک مورد تزریق  
 $D_{15}$  = اندازه قطر دانه های خاک مورد تزریق که ۱۵ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است  
 $d_{95}$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۹۵ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است

ویور (Weaver) با استفاده از رابطه میچل، امکان تزریق پذیری خاک ها را بصورت زیر تقسیم کرد [۵]:  
 $GR > 24$  تزریق پذیر می باشد.

$19 < GR < 24$  اجرای عملیات تزریق مشکل بوده اما امکانپذیر است.

$11 < GR < 19$  اجرای عملیات تزریق امکان پذیر بوده اما امید زیادی به موفقیت عملیات وجود نخواهد داشت.  
 $GR < 11$  امکان اجرای عملیات تزریق وجود ندارد.

شرارد (Sherard) و همکارانش روشی را برای اندازه گیری ساختمان پیچیده حفره ها و منافذ شرح داده اند [۶]. یک نمونه از شن به قطر ۹/۵ تا ۲۵ میلیمتر را که در آن  $D_{15} = 11 \text{ mm}$  بود در یک ظرف استوانه ای، و بیره نموده و سپس موم مذاب روی آن ریخته شد تا حفرات و منافذ آن را کاملاً پر نماید. پس از سرد شدن موم ظرف را برداشته و نمونه را چند قطعه نمودند. شنها را به دقت از آن جدا نموده و شبکه ای از موم را که پیکره حفره ها و منافذ را نشان میداد مورد مطالعه قرار دادند. از مطالعه اسکلت مومی، روابط زیر تعیین گردید:

- در طول حدود  $10D_{15}$ ، مقاطع حداکثر و حداقل مجراهای جریان نامنظم بارها تکرار شده و در آن، مجاری خیلی بزرگ یا خیلی کوچک وجود نداشت.

- ابعاد حداقل مجراهای جریان در ردیف بین  $0.1D_{15}$  و  $0.18D_{15}$  بود.

- متوسط ابعاد مجراهای جریان بین  $0.25D_{15}$  و  $0.35D_{15}$  برآورد گردید و حداکثر ابعاد، همه جا کمتر از  $0.6D_{15}$  بود.

با استفاده از این روابط می توان استنباط کرد که سوسپانسیون با اندازه ذرات حداکثر  $D_s$  می تواند در یک

۳) ذرات خاک میتوانند بینهایت حالت در کنار هم قرارگیرند که در اینجا فقط دو حالت متقارن و نامتقارن مورد بررسی قرار میگیرد.

۴) ذرات خاک حداقل در ۴ نقطه در حالت متقارن و حداقل در ۳ نقطه در حالت نامتقارن با هم تماس دارند.

۵) فضای خالی موثر دایره ای خواهد بود که بر ذرات خاک مماس می باشد و محل تلاقی محورهای مماسی ذرات خاک، مرکز دایره است.

#### الف - تعیین میزان فضای خالی در حالت متقارن

در این حالت ذرات خاک بصورت کاملاً متقارن قرار دارند (شکل ۱) و یک نقطه مرکز تقارن در مرکز محورهای تماسی آنها وجود دارد. در این وضعیت فضای خالی موثر بین ذرات حداکثر خواهد بود (شکل ۲). ابتدا حجم فضای خالی موجود را محاسبه می کنیم و سپس قطر فضای خالی موثر را بدست می آوریم:

خاک متراکم که بطوریکه  $D_{85}=0.1D_{15}$  باشد، بخوبی نفوذ نماید.

همچنین بل (Bell) با استفاده از تجارب عملی به این نتیجه رسید که حداکثر ذرات سوسپانسیون باید کمتر از یک سوم متوسط اندازه حفرات و منافذ باشد [۷]. که با رابطه شرارد بخوبی مطابقت می کند.

جدول (۱) فعالیت محققین دیگر را در ارتباط با این موضوع نشان می دهد.

#### ارائه مدل ریاضی جهت تعیین قطر فضاهای خالی موثر بین ذرات خاک

در مدل حاضر مفروضات ذیل در نظر گرفته می شود:

۱) ذرات خاک کاملاً مدور و کروی هستند.

۲) خاک حالت کاملاً یکنواخت دارد (ذرات خاک دارای ابعاد یکسان میباشند).

جدول ۱: روابط مختلف در تعیین نسبت مناسب بین ذرات خاک و ذرات جامد معلق در مایع تزریق.

سال ارائه	مرجع	نتیجه تزریق موفقیت آمیز نمیباشد	نتیجه تزریق موفقیت آمیز میباشد	روابط موجود برای تعیین نسبت تزریق پذیری
۱۹۵۸	بورول [8] (Burwell)	$GR < 11$	$GR > 25$	$GR = \frac{D_{15}(soil)}{d_{85}(grout)}$
۱۹۵۸	بورول [8] (Burwell)	$GR < 5$	$GR > 11$	$GR = \frac{D_{10}(soil)}{d_{95}(grout)}$
۱۹۹۵	سرن [9] (Ceren)	-	$GR > 10$	$GR = \frac{D_{10}(soil)}{d_{90}(grout)}$
۱۹۹۵	سرن [9] (Ceren)	-	$GR > 3$	$GR = \frac{D_m(soil)}{d_{90}(grout)}$

$D_{15}(soil)$  = اندازه قطر خاک مورد تزریق که ۱۵ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است

$D_{10}(soil)$  = اندازه قطر خاک مورد تزریق که ۱۰ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است

$D_m(soil)$  = اندازه فضاهای خالی بین ذرات مختلف خاک

$d_{85}(grout)$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۸۵ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است

$d_{95}(grout)$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۹۵ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است

$d_{90}(grout)$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۹۰ درصد آن از نظر وزنی کوچکتر از این مقدار است

$$V_o = V_t - V_s \quad (1)$$

$$V_t = d_s^3 \quad (2)$$

$$V_s = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_s}{2} \right)^3 = 0.52 d_s^3 \quad (3)$$

$d_s$  = قطر ذره خاک که با طول مکعب برابر است

$V_o$  = حجم فضای خالی

$V_t$  = حجم مکعب محاط بر ذره خاک

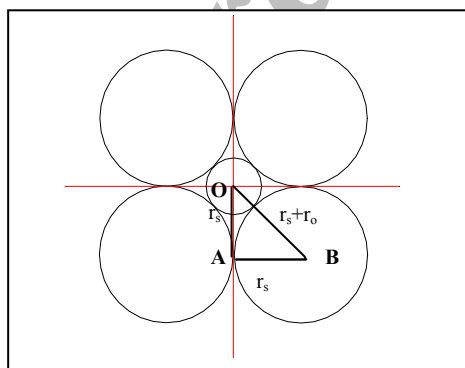
$V_s$  = حجم یک ذره خاک

با قرار دادن روابط (۲) و (۳) در رابطه (۱) حجم فضای خالی در حالت متقارن بدست خواهد آمد:

$$V_o = d_s^3 - 0.52 d_s^3 = d_s^3 (1 - 0.52) = 0.48 d_s^3 \quad (4)$$

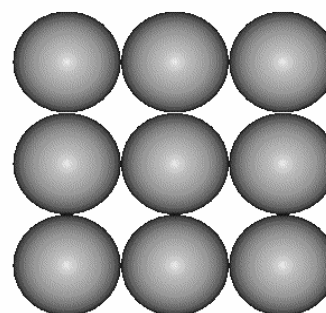
$$\text{درصد فضای خالی} = \frac{V_o}{V_t} \times 100 = \frac{0.48 d_s^3}{d_s^3} \times 100 = 48\% \quad (5)$$

از کنار هم قرار دادن المان‌ها محیط مورد نظر بوجود می‌آید که در نهایت می‌توان استنباط کرد که در صورت قرار گرفتن ذرات یکسان بطور متقارن در کنار هم مطابق رابطه (۵)، ۴۸ درصد حجم آن محیط فضای خالی است که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. به منظور بررسی این موضوع که آیا فضای خالی بوجود آمده قابلیت گذردهی ذرات سیمان را دارد یا خیر، باید قطر فضای خالی موثر بدست آید و با قطر موثر ذرات سیمان مقایسه شود.

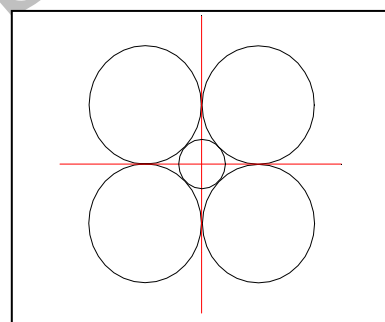


شکل ۴: فضای خالی موثر در حالت متقارن.

اگر فضای خالی موثر بین ذرات کروی خاک دایره‌ای با شعاع  $r_o$  فرض شود (شکل ۴)، مثلث بوجود آمده از

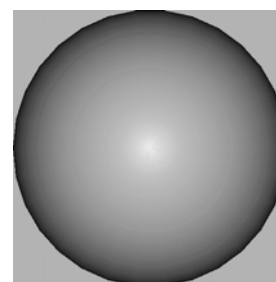


شکل ۱: حالت قرارگیری متقارن ذرات خاک.



شکل ۲: حالت قرارگیری متقارن و فضای خالی موجود.

یک المان مکعبی که طول ضلع آن برابر با قطر یک ذره خاک است را در نظر می‌گیریم و حجم فضای خالی موجود در این المان زمانیکه یک ذره خاک درون آن قرار دارد را محاسبه می‌کنیم (شکل ۳).

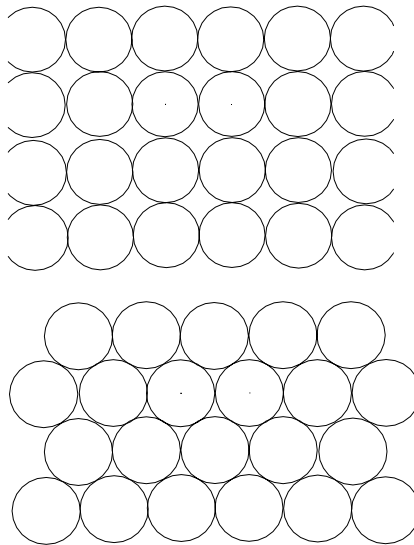


شکل ۳: قرار گرفتن یک کره درون المان مکعبی محاط بر آن.

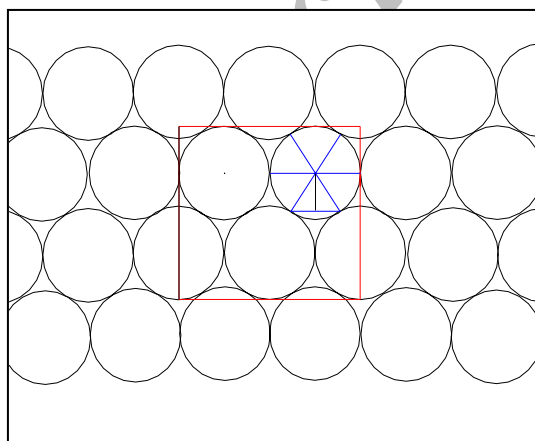
$d_s$  و ارتفاع  $H$  که نسبتی از  $d_s$  است در نظر گرفته می شود (شکل ۷ و ۸). با محاسبه  $H$  می توان حجم المان مکعب مستطیل را بدست آورد. با توجه به شکل های (۸) و (۹) میتوان چنین نوشت:

$$H = L + d_s \quad (۷)$$

$$L = r_s + h - l \quad (۸)$$



شکل ۶: مقایسه فضای خالی موجود بین دو حالت متقارن و نامتقارن.



شکل ۷: قرارگیری ذرات بصورت نامتقارن در کنار هم و انتخاب المان مکعب مستطیل.

اتصال مرکز فضای خالی موثر و مرکز یکی از ذرات خاک و همچنین نقطه تماس بین دو ذره خاک یک مثلث قائم الزاویه متساوی الساقین است که طول هر ضلع قائمه آن برابر با شعاع ذره خاک و طول وتر آن برابر با مجموع شعاع ذره خاک و شعاع فضای خالی موثر می باشد. بنابراین با استنباط از مثلث  $OAB$  رابطه (۶) بدست می آید.

$$\begin{aligned} \triangle OAB \\ OB^2 &= OA^2 + AB^2 \\ (r_s + r_o)^2 &= r_s^2 + r_s^2 \\ r_o &= 0.41 r_s \\ d_o &= 0.414 d_s \end{aligned} \quad (۶)$$

$$I_o = \text{شعاع فضای خالی موثر}$$

$$I_s = \text{شعاع ذره خاک}$$

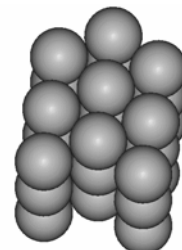
$$d_o = \text{قطر فضای خالی موثر}$$

$$d_s = \text{قطر ذره خاک}$$

همانطوریکه از رابطه (۶) برمی آید قطر فضای خالی موثر درصدی از قطر ذرات خاک خواهد بود. به این ترتیب با کاهش یا افزایش اندازه ذرات خاک اندازه فضای خالی موثر نیز کاهش یا افزایش می یابد.

### ب - تعیین میزان فضای خالی در حالت نامتقارن

در این حالت ذرات خاک بصورت بهم فشرده به شکلی در هم فرو رفته اند که حداقل فضای خالی بوجود می آید (شکل ۵). در این وضعیت فضای خالی موجود بین ذرات خاک کمترین حالت ممکن است (شکل ۶). در این حالت نیز ابتدا حجم فضای خالی موجود بین ذرات خاک محاسبه شده و سپس قطر فضای خالی موثر بدست خواهد آمد.



شکل ۵: قرارگیری ذرات خاک بصورت نامتقارن.

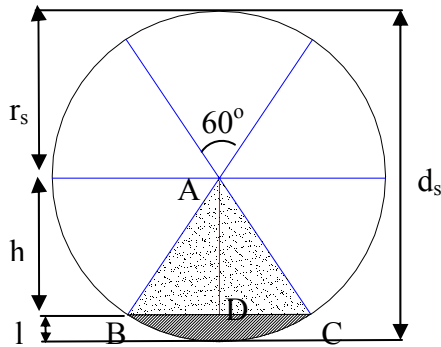
برای محاسبه حجم فضای خالی موثر در حالت نامتقارن یک المان مکعب مستطیل به طول  $2d_s$  و پهنای

با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۸) داریم:

$$L = 2h \Rightarrow L = 0.86 d_s \quad (12)$$

با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۷) داریم:

$$H = d_s + 0.86 d_s = 1.86 d_s \quad (13)$$



شکل ۹: تقسیم شدن یک ذره خاک به ۶ قسمت مساوی در اثر تماس با دیگر ذرات.

برای محاسبه حجم فضای خالی، حجم ذرات خاک درون مکعب مستطیل را از حجم مکعب مستطیل کم می کنیم:

$$V_o = V_t - (V_s \times N_1 + V_n \times N_2) \quad (14)$$

$V_n$  = حجم یک قطعه از دایره که درون مکعب مستطیل قرار می گیرد.

$N_1$  = تعداد ذرات خاک

$N_2$  = تعداد قطعاتی از خاک که درون مکعب مستطیل قرار می گیرند.

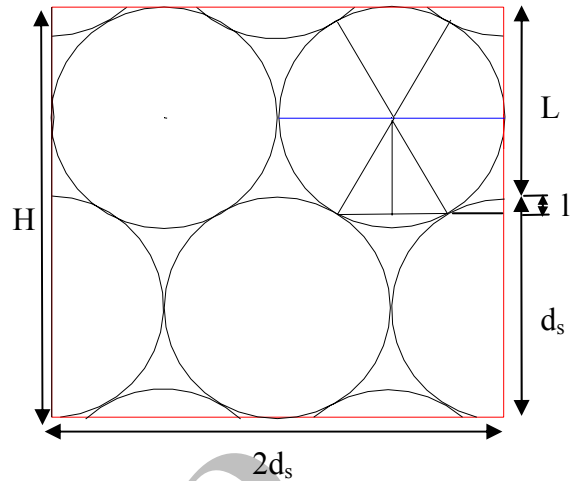
حجم یک قطعه به طول  $l$  از دایره ای به قطر  $d_s$  بصورت زیر محاسبه می شود (قسمت تیره در شکل (۹)).

$$V_n = \pi \cdot l^2 \left( \frac{d_s}{2} - \frac{l}{3} \right) \quad (15)$$

با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۵) داریم:

$$V_n = \pi \cdot (0.07 d_s)^2 \cdot \left( \frac{d_s}{2} - \frac{(0.07 d_s)}{3} \right) = 0.007 d_s^3 \quad (16)$$

$$V_t = (2 d_s \times d_s \times 1.86 d_s) = 3.72 d_s^3 \quad (17)$$



شکل ۸: فرارگیری ذرات خاک و قطعاتی از خاک در یک المان مکعبی.

با فرض اینکه ذرات خاک کاملاً منظم بهم چسبیده اند یک ذره خاک در ۶ نقطه با فاصله مساوی با دیگر ذرات تماس دارد که آن را به ۶ قسمت مساوی تقسیم می کند و اگر از مرکز دایره به نقاط تماسی وصل شود زوایای مرکزی  $60^\circ$  بوجود می آید همچنین وتر حاصل از اتصال دو نقطه تماسی مجاور هم برابر با شعاع دایره می شود. می توان مثلث هاشور خورده در شکل (۹) را یک مثلث متساوی الاضلاع در نظر گرفت که طول اضلاع آن شعاع ذره خاک است. بنابراین  $h$  ارتفاع و میانه و نیمساز زاویه می باشد. بنابراین برای محاسبه  $h$  با در نظر گرفتن مثلث  $ABD$  میتوان نوشت:

$$\begin{aligned} r_s^2 &= \left( \frac{r_s}{2} \right)^2 + h^2 \\ h^2 &= r_s^2 - \frac{r_s^2}{4} \\ h^2 &= 0.75 r_s^2 \Rightarrow h = 0.87 r_s \\ r_s &= \frac{d_s}{2} \Rightarrow h = 0.43 d_s \end{aligned} \quad (9)$$

با استفاده از شکل (۹) می توان رابطه (۱۰) را نتیجه گرفت:

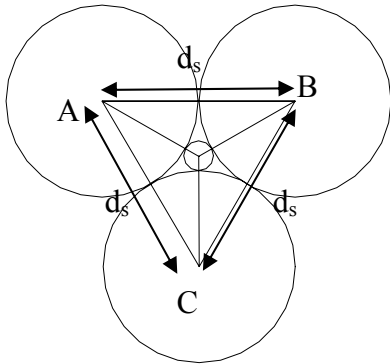
$$l = r_s - h \quad (10)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۱۰) چنین حاصل میگردد:

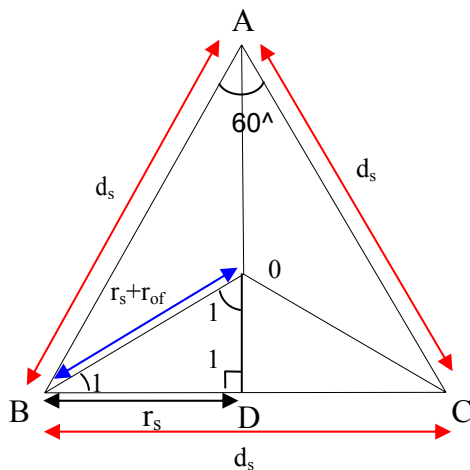
$$l = \frac{d_s}{2} - 0.43 d_s \Rightarrow l = 0.07 d_s \quad (11)$$

$r_{of}$  = شعاع فضای خالی در حالت نامتقارن

$d_{of}$  = قطر فضای خالی در حالت نامتقارن



شکل ۱۰: اتصال مرکز به مرکز ذرات مجاور خاک که مثلث متساوی الاضلاع ABC را بوجود می آورد.



شکل ۱۱: مثلث متساوی الاضلاع ABC.

همانطور که از رابطه (۲۰) بر می آید قطر فضای خالی موثر را می توان بر حسب اندازه ذرات خاک بیان کرد که نشان می دهد با کوچک شدن ذرات خاک، قطر فضای خالی موثر نیز کوچک می شود. جدول (۲) قطر فضای خالی موثر را بر حسب اندازه ذرات مختلف خاک بیان می کند و شکل (۱۲) دامنه تغییرات فضای خالی موثر برای اندازه های مختلف ذرات خاک را بیان می کند.

با استفاده از شکل (۸) بطور وضوح می توان دریافت که  $N_1=N_2=4$  و همچنین با قرار دادن رابطه (۳) بجای پارامتر  $V_s$  در رابطه (۱۲)، رابطه (۱۲) بصورت زیر در می آید.

$$V_s = 3.72d_s^3 - (4 \times 0.52d_s^3 + 4 \times 0.007d_s^3) = 1.612d_s^3 \quad (18)$$

درصد فضای خالی با استفاده از رابطه (۵) بدست می آید:

$$V_0 = \frac{1.612 d_s^3}{3.72 d_s^3} = 43 \% \quad (19)$$

آنچه از رابطه (۱۹) بر می آید این است که با تغییر مکان ذرات خاک نسبت به هم در حجم فضای خالی تغییر زیادی ایجاد نمی شود و همچنان درصد فضای خالی خاک عدد بزرگی را نشان می دهد اما عمده تغییرات بوجود آمده در این حالت در قطر موثر فضای خالی می باشد که بصورت زیر محاسبه می شود.

اگر سطح فضای خالی بوجود آمده را یک دایره با شعاع  $r_{of}$  در نظر بگیریم با بدست آوردن قطر این دایره می توان قطر فضای خالی موثر در حالت نامتقارن را بدست آورد. با اتصال مرکز به مرکز ذرات مجاور، مثلث متساوی الاضلاعی بدست می آید که طول اضلاع آن برابر با قطر ذرات خاک ( $d_s$ ) و محل تلاقی میانه ها و ارتفاع ها و نیمسازهای آن مثلث مرکز دایره ای است که فضای خالی موثر محسوب می شود (شکل ۱۰).

همانطور که از شکل (۱۱) می توان نتیجه گرفت پاره خط BO نیمساز زاویه B است بنابراین زاویه  $B_1=30^\circ$  می باشد و نیز پاره خط AD هم میانه و هم ارتفاع ضلع BC می باشد بنابراین پاره خط BD برابر با شعاع ذره خاک ( $r_s$ ) و زاویه  $D_1$  زاویه قائمه است (شکل ۱۱).

$\Delta BOD$

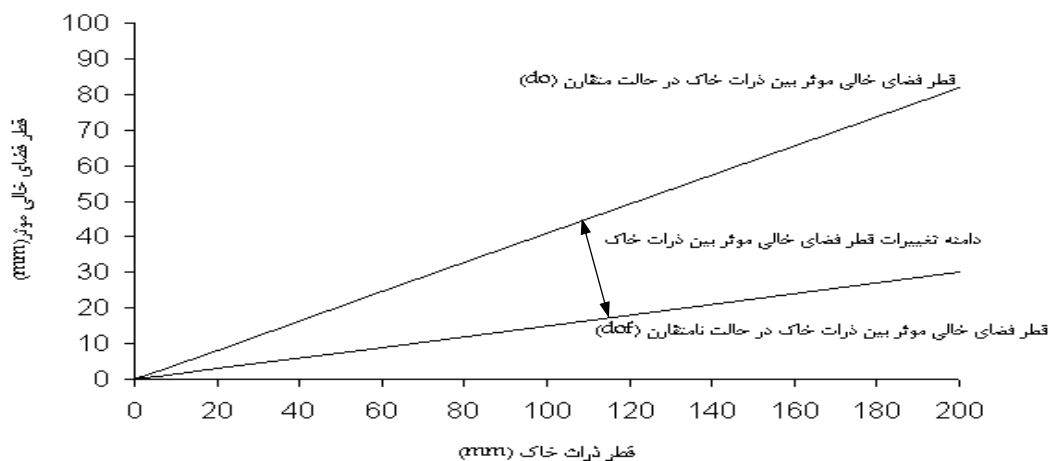
$$\sin \angle O_1 = \frac{BD}{BO} \Rightarrow \sin 60^\circ = \frac{r_s}{(r_s + r_{of})}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{d_s}{d_s + d_{of}} \Rightarrow 0.87(d_s + d_{of}) = d_s$$

$$d_{of} = 0.15 d_s \quad (20)$$

جدول ۲: رابطه بین فضای خالی موثر در دو حالت متقارن و نامتقارن با ذرات مختلف خاک.

ذرات مختلف خاک	اندازه ذرات خاک $d_s$ (mm)	قطر فضای خالی موثر در حالت متقارن $d_o$ (mm)	قطر فضای خالی موثر در حالت نامتقارن $d_{of}$ (mm)
قلوه سنگ (Boulder)	$d_s > 200$	$d_o > 82$	$d_{of} > 30$
سنگریزه (Cobbel)	$60 < d_s < 200$	$24.6 < d_o < 82$	$9 < d_{of} < 30$
شن (Gravel)	دانه درشت	$8.2 < d_o < 24.6$	$3 < d_{of} < 9$
	دانه متوسط	$2.46 < d_o < 8.2$	$0.9 < d_{of} < 3$
	دانه ریز	$0.82 < d_o < 2.46$	$0.3 < d_{of} < 0.9$
ماسه (sand)	دانه درشت	$0.246 < d_o < 0.82$	$0.09 < d_{of} < 0.3$
	دانه متوسط	$0.082 < d_o < 0.246$	$0.03 < d_{of} < 0.09$
	دانه ریز	$0.024 < d_o < 0.082$	$0.009 < d_{of} < 0.03$
لای (Silt)	دانه درشت	$0.0082 < d_o < 0.024$	$0.003 < d_{of} < 0.009$
	دانه متوسط	$0.0024 < d_o < 0.0082$	$0.0009 < d_{of} < 0.003$
	دانه ریز	$0.00082 < d_o < 0.0024$	$0.0003 < d_{of} < 0.0009$



شکل ۱۲: رابطه بین قطر فضای خالی موثر در دو حالت متقارن و نامتقارن و قطر ذرات خاک.

موثر در حالت نامتقارن باشد می توان انتظار داشت که ذرات سیمان از خلل و فرج خاک بخوبی عبور می کند. در این حالت میتوان چنین نوشت:

$$d_{100 \text{ cement}} < d_{of}$$

(۲۱)

**تعیین اندازه بهینه سیمان موجود در آمیزه تزریق با استفاده از روابط بدست آمده**

ذرات خاک زمانیکه به حالت نامتقارن در کنار هم قرار گیرند فضای خالی موثر به کوچکترین حد خود می رسد بنابراین اگر ذرات سیمان کوچکتر از فضای خالی



میتوان خاکهای بزرگتر از ماسه دانه ریز و همچنین در صورت استفاده از سیمان ریزدانه MC-100 میتوان خاکهای بزرگتر از لای درشت دانه را تزریق نمود.

### تعمیم روابط بدست آمده برای خاک های معمولی

معمولاً توزیع اندازه دانه های یک خاک را بدلیل گستردگی و تنوع اندازه ذرات بر روی محورهای مختصات نیمه لگاریتمی نشان می دهند. در یک خاک معمولی می توان بی نهایت اندازه برای ذرات در نظر گرفت (شکل ۱۴) و همچنین بی نهایت حالت برای قرارگیری ذرات در کنار هم باید متصور بود. بنابراین بی نهایت اندازه برای فضای خالی بین ذرات وجود دارد. اما برای تعیین اندازه حداکثر ذرات سیمان موجود در آمیزه تزریق باید سیمانی را تعیین کرد که از کوچکترین فضای خالی عبور کند. یکی از اینگونه فضاهای خالی موثر زمانی بوجود می آید که سه ذره دانه ریز خاک بصورت نامتقارن در کنار هم قرار گیرند. بنابراین اگر  $D_{10}$  خاک ها را به عنوان اندازه موثر خاک در نظر بگیریم و این ذرات بصورت نامتقارن در کنار هم قرار گیرند انتظار داریم یکی از فضاهای خالی کوچک بوجود آید.

با قرار دادن رابطه (۲۰) در رابطه (۲۱) داریم:

$$d_{100 \text{ cement}} < 0.15 d_s$$

$$d_s > 7 d_{100 \text{ cement}} \Rightarrow \frac{d_s}{d_{100 \text{ cement}}} > 7$$

(۲۲)

$d_{100 \text{ cement}}$  = بزرگترین اندازه ذرات سیمان معلق در مایع تزریق

با استفاده از رابطه (۲۲) و با داشتن نوع و دانه بندی ذرات سیمان معلق در مایع تزریق و همچنین ذرات خاک می توان محدوده تزریق پذیری را با داشتن اندازه سیمان برای خاک های مختلف بدست آورد. در شکل (۱۳) با قرار دادن اندازه سه نوع سیمان مختلف در رابطه (۲۲) محدوده ای از خاکها را که توسط این نوع سیمان ها قابل تزریق میباشند بدست می آید. بعنوان مثال در تزریق با سیمان پورتلند معمولی، با جایگذاری  $d_{100 \text{ cement}} = 0.1 \text{ mm}$  در رابطه (۲۲) محدوده قابل تزریق خاکها بصورت  $d_s > 0.7 \text{ mm}$  بدست می آید. یعنی در صورت استفاده از سیمان پورتلند معمولی در عملیات تزریق خاکها فقط میتوان خاکهایی را تزریق کرد که اندازه ذرات آنها بزرگتر از  $0.7 \text{ mm}$  باشند که این محدوده خاکهای بزرگتر از ماسه درشت دانه را شامل میشود. در صورت استفاده از سیمان ریزدانه MC-500

نوع سیمان [10]	$d_{100 \text{ cement}}$ (mm)	شن (mm)			ماسه (mm)			لای (mm)		
		دانه درشت	دانه متوسط	دانه ریز	دانه درشت	دانه متوسط	دانه ریز	دانه درشت	دانه متوسط	دانه ریز
		60-20	20-6	6-2	2-0.6	0.6-0.2	0.2-0.06	0.06-0.02	0.02-0.006	0.006-0.002
سیمان پورتلند معمولی	0.1									
سیمان میکروفاین (MC-500)	0.013									
سیمان میکروفاین (MC-100)	0.007									

شکل ۱۳: تزریق پذیری بر پایه رابطه بین اندازه ذرات سیمان معلق در مایع تزریق و اندازه خاک.

موفق در پروژه های مختلف از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از اینرو، در این مقاله، رابطه بین اندازه ذرات خاک و سیمان در آمیزه تزریق مورد مطالعه قرار گرفت. در نتیجه مدل ریاضی مبتنی بر ابعاد ذرات خاک و فضاهای خالی محاط در آن ها ارائه گردید که با استفاده از آن قطر فضای خالی موثر بین ذرات خاک محاسبه میگردد.

نتایج حاصل از بکارگیری مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله را میتوان بطور خلاصه بصورت زیر بیان نمود:

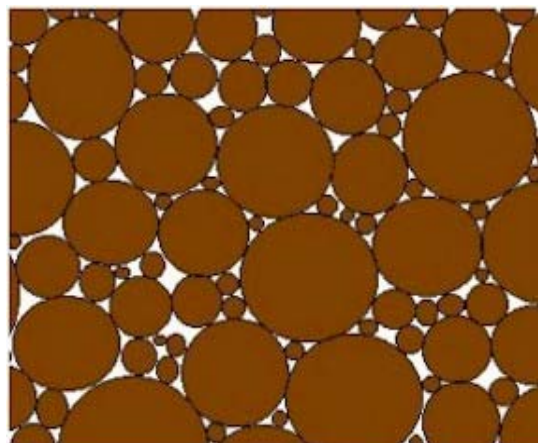
۱- قطر فضای خالی موثر بین ذرات خاک بستگی به اندازه ذرات خاک دارد.

۲- بزرگترین قطر فضاهای خالی موثر در یک محیط خاکی با دانه بندی یکنواخت زمانی بوجود میآید که ذرات خاک بصورت متقارن در کنار هم قرار گیرند.

۳- کوچکترین قطر فضاهای خالی موثر در یک محیط خاکی با دانه بندی یکنواخت زمانی بوجود میآید که ذرات خاک بصورت نامتقارن در کنار هم قرار گیرند.

۴- برای تعیین اندازه بهینه سیمان مصرفی در آمیزه تزریق باید اندازه ذرات سیمان طوری باشد که از فضای خالی موثر بین ذرات خاک که بصورت نامتقارن قرار می گیرند، کوچکتر باشد.

۵- ذرات سیمان بکار رفته در آمیزه تزریق زمانی از خلل و فرج خاک بخوبی عبور میکنند که نسبت  $D_{10}$  خاک به  $d_{100}$  سیمان بزرگتر از ۷ باشد.



شکل ۱۴: قرارگیری ذرات مختلف خاک در کنار هم.

بنابراین برای تعیین ذرات بهینه سیمان در آمیزه تزریق باید بزرگترین ذرات سیمان معلق در مایع تزریق از کوچکترین فضای خالی موجود در خاک عبور کند با تعمیم رابطه (۲۲) برای خاک های معمولی چنین حاصل میگردد:

$$d_{100\text{ cement}} < 0.15 D_{10\text{ soil}} \Rightarrow \frac{D_{10\text{ soil}}}{d_{100\text{ cement}}} > 7 \quad (23)$$

## نتیجه گیری

ارزیابی پارامترهای موثر در ساخت و اجرای تزریق

## مراجع

- 1 - Nonveiller, E. (1989). *Grouting theory and practice*. Elsevier, Amsterdam.
- 2 - Majdi, A., Pourrahimian, Y. and Bagheri, H. (2004). "Theoretical prediction of grout-take in jointed rock masses." *5th International Conference on Ground Improvement Techniques*, 22-23, March, K. Lumpur, Malaysia, PP. 237-244.
- 3 - Hvorslev, M. J. (1951). "Time lag and soil permeability in ground-water observations." *Bulletin, No. 36, Water Ways Experimental Station, U.S. Corps of engineers*, Vicksburg, Mississippi.
- 4 - Mitchell, J. K. (1970). "In-place treatment of foundation soils." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 96, No. 1*, PP. 73-110.
- 5 - Weaver, K. D. (1991). *Dam foundation grouting*. American society of civil engineers, New York, N.Y.
- 6 - Sherard, J. L. and Dunningan, L. P. (1984). "Basic Properties of Sand and Gravel Filters." *J.G. ASCE*, New York, Vol. 110, No. 6, PP. 684 -750.
- 7- Bell, L.A. (1982). "A cut-off in rock alluvium at Asprokremmos Dam." *CGGE*, New Orleans, PP. 172-186.

- 
- 8 - Burwell, E. B. (1958). "Cement and clay grouting of foundations." *Practice of the Corps of Engineering. J. Soil Mech. Foundation Div., ASCE 84*, PP. 1551/1-1551/22.
- 9 - Incecik, M., Ceren, I. (1995). *Cement grouting model tests*. Bulletin of the Technical University of Istanbul, Istanbul, Vol. 48, No. 2, PP. 305-317.
- 10- Clarke, W. J. (1995). *Personal Correspondence*.

Archive of SID