



گرانروی دینامیک دوغاب های سیمان پایه و تاثیر آن بر شعاع نفوذ

* پرویز معارف وند**؛ سید رسول علوی

چکیده

در این مقاله ما به بررسی دوغاب تزریقی می پردازیم. گرانروی دینامیک خاصیتی از مایعات است که چنانچه سرعت جریان در مقاطع عرضی متغیر باشد، تولید مقاومت برشی می کند. محاسبه مقاومت برشی این امکان را به ما می دهد که طول نفوذ (شعاع تاثیر) مواد تزریقی سیمان پایه را محاسبه کنیم و از این رو طراحی پرده تزریق را بهتر انجام دهیم. از آنجا که در سایت تزریق به دلیل تغییر ناگهانی و پیش بینی نشده شرایط زمین شناسی ممکن است از دوغابهای مختلف با نسبت اختلاط مختلفی استفاده شود، همچنین، تاکنون تعیین میزان شعاع تاثیر دوغاب در آزمایشگاه ها و بطور تئوری انجام می گرفته است و تا بدست آمدن نتایج از آزمایشگاه و همچنین وجود شرایط زمین شناسی متغیر در سایت تزریق، ممکن است این منطقه تزریق شده باشد، در حالی که شعاع تاثیر دوغاب به دقت برای منطقه محاسبه نشده باشد. بنابراین جهت نظارت بهتر بر عملیات تزریق لازم است میزان گرانروی دینامیک در همان لحظه تزریق تعیین شود. با فرو بردن یک اشل استاندارد در دوغاب می توان به روشی برای محاسبه مستقیم مقاومت برشی دوغاب دست یافت. میزان فرو رفتن اشل به تنش برشی موجود در سطح تماس اشل و دوغاب بستگی دارد. برای بهینه کردن نتایج، مقاومت برشی بدست آمده بوسیله اشل با مقاومت برشی بدست آمده از گرانروی سنج در آزمایشگاه با هم مقایسه می شوند.

واژه های کلیدی: دوغاب، گرانروی دینامیک، شعاع تاثیر دوغاب، تزریق، اشل استاندارد

* استادیار دانشکده مهندسی معدن، متالوژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک) تهران Parvizz@aut.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک) تهران Rasool.alavi@aut.ac.ir



۱- مقدمه

سه عامل اصلی دوغاب تزریقی (سیمان، آب و مواد افزودنی) هر کدام تاثیرات مهم و به سزایی بر روی نحوه و کیفیت تزریق دارند. بنابراین شناسایی ویژگی های آنها ما را در انجام تزریق بهتر توده سنگ یاری خواهد کرد [۱]. سوسپانسیون تزریق باید ۲ ویژگی مهم داشته باشد، اولاً خیلی خوب در محیط جریان پیدا کند و ثانیاً پایداری خیلی خوبی داشته باشد. یک دوغاب تزریقی خوب دوغابی است که، در عین حالی که بیشترین شعاع تاثیر را دارد همزمان بیشترین پایداری را نیز داشته باشد. در دوغاب های تزریقی، معمولاً افزایش نسبت W/C میزان پایداری سوسپانسیون را بالا برده و مقاومت آن را کاهش می دهد و کاهش آن میزان مقاومت سوسپانسیون را افزایش می دهد، ولی بعلا افزایش ژل شدگی سوسپانسیون که علت آن افزایش چسبندگی بین ذرات سیمان در سوسپانسیون است مقاومت برشی آن افزایش می یابد و مواد شروع به ته نشین شدن می کنند و این امر خود باعث کاهش میزان شعاع تاثیر خواهد شد [۱]. این شعاع نفوذ بستگی به گرانیوزی و مقاومت ایجاد شده دارد [۲]. ویژگی اصلی سوسپانسیون ها توسط گیزکسون^۱ (۱۹۸۳) توصیف شده است [۳]. یک سوسپانسیون رقیق همانند یک سیال نیوتنی رفتار می کند اما چنانچه غلظت ذرات افزایش یابد نیروهای هیدرودینامیکی و الکتریکی منجر به رفتار پیچیده تر و خواص برشی غیر نیوتنی آن می شود [۴]. جریان سوسپانسیون موقعی متوقف می شود که گرادیان فشار تزریق برای فائق آمدن بر مقاومت در برابر جریان کافی نباشد [۵]. طول نفوذ (شعاع تاثیر) به میزان بازشدگی درزه، میزان فشار تزریق و تنش تسلیم دوغاب وابسته است. از این رو تنها ویژگی دوغاب که جهت محاسبه (بیشترین طول نفوذ) شعاع تاثیر قابل کاربرد است، تنش تسلیم دوغاب است [۶].

۲- مدل رئولوژی دوغاب سیمان پایه

رئولوژی علم جریان و تغییر شکل ماده است. مواد می توانند در معرض تغییر شکل های متعددی نظیر تغییر شکل طولی، حجمی و برشی قرار گیرند. در جدول (۱) تاثیر ویژگی های مختلف سوسپانسیون تزریق بر رئولوژی دوغاب نشان داده شده است [۳].

جدول (۱): تاثیر فاکتورها و افزودنی های مختلف بر رئولوژی دوغاب [۷].

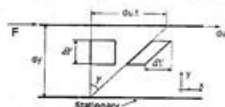
^۱ Giesekus, 1983



| افزودنی یا اعمال تغییر | نتیجه | |
|------------------------------|-----------|-----------|
| | تنش تسلیم | ویسکوزیته |
| کاهش نسبت W/C | +++ | +++ |
| افزودن میزان سطح مخصوص سیمان | ++ | ++ |
| کاهش دما | ++ | + |
| افزایش بنتونیت | ++ | ++ |
| افزایش سوپرپلاستیسایزر | --- | --- |
| افزایش زیاد | | +++ |
| افزایش متوسط | | ++ |
| افزایش ناچیز | | + |
| کاهش زیاد | | --- |

برش از جمله تغییر شکل هایی است که در رئولوژی مواد بسیار مهم است. این نوع تغییر شکل در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل فرض می شود که سیالی ویسکوز، کاملاً فضای مابین دو صفحه موازی را پر کرده است. فاصله این دو صفحه dy است. اعمال نیروی F بر صفحه بالایی باعث می شود تا این صفحه با سرعت ثابت du نسبت به صفحه ثابت پایینی حرکت کند. چون سیال دارای ویسکوزیته است لذا نیروی F سبب پیدایش یک نیروی برشی τ_{yx} در زیر صفحه بالایی می گردد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A} \quad (1)$$



شکل (۱): برش ساده سیال مابین دو صفحه موازی [۸].

در مدت زمان t صفحه بالایی به میزان $du.t$ جابجا خواهد شد. با این فرض که هیچ گونه لغزشی در سطح صفحات وجود نداشته و اینرسی قابل نظر کردن نباشد، هر المان از سیال دقیقاً در معرض یک تغییر شکل موضعی قرار خواهد گرفت. کرنش برشی (۲) اعمال شده به



المان به صورت زیر تعریف می شود [۸]:

$$\gamma = \frac{du}{dy} \quad (2)$$

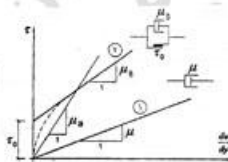
$$\kappa = \frac{dy}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (3)$$

رابطه بین تنش برشی (τ_{xy}) و نرخ برش (κ) بیانگر رفتار رئولوژیکی سیال است. برخی از این روابط در جدول زیر آمده است:

جدول (۲): نمونه هایی از مدل های رئولوژیکی [۴].

| رابطه | نام مدل |
|--|----------------|
| $\tau = \mu \dot{\gamma}$ <td>نیوتنی</td> | نیوتنی |
| $\tau = k(\dot{\gamma})^n$ <td>توان</td> | توان |
| $\tau = \tau_0 + \mu_s \dot{\gamma}$ <td>بینگهام</td> | بینگهام |
| $\tau = \frac{\tau_0}{1 + \left(\frac{\tau_0}{k}\right) (\dot{\gamma})^{1-n}}$ <td>توان اصلاح شده</td> | توان اصلاح شده |
| $\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + \mu_s^{1/n} (\dot{\gamma})^{1/n}$ <td>کاسون</td> | کاسون |

منحنی شدت برش- تنش برشی به منحنی جریان موسوم است. شیب این منحنی برای یک سیال نیوتنی ثابت بوده و مساوی مقدار ویسکوزیته (μ) می باشد. در سیال غیر نیوتنی مقدار ویسکوزیته ثابت نبوده و به نرخ برش بستگی دارد [۴، ۸]. در شکل (۲) نمودار جریان مربوط به سیال نیوتنی و بینگهام نشان داده شده است. برخلاف سیال نیوتنی، مواد بینگهام قادرند تا تنش های انحرافی غیر صفر را در شرایط ساکن تحمل نمایند و در تنش های برشی کمتر از مقدار تنش تسلیم (τ_0) جریان نمی یابند. هنگامی که بر تنش تسلیم غلبه شود، جریان رخ می دهد [۹].



شکل (۲): رئولوژی سیال بینگهام و نیوتنی [۱۰].

$$\tau = \mu \frac{du}{dv} \quad \text{سیال نیوتنی مانند آب}$$

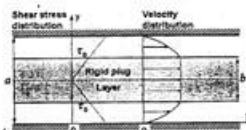
$$\tau = \tau_0 + \mu_s \frac{du}{dy} \quad \text{سیال بینگهام مانند دوغاب}$$



منحنی خط چین سوسپاسیون واقعی پایدار، τ_0 : تنش تسلیم (چسبندگی)، μ : ویسکوزیته دینامیکی، μ_B ویسکوزیته پلاستیک، μ_a ویسکوزیته ظاهری.

در شکل (۲) نمودار خط چین مربوط به یک دوغاب سوسپانسیونی پایدار واقعی است. شیب نمودار جریان سیال بینگنهام، ویسکوزیته پلاستیک (μ_B) نامیده می شود. [۷]، [۱۱]، [۱۲]. برای مدلسازی جریان دوغاب تنها دو پارامتر ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم مورد استفاده قرار می گیرد [۷]، [۸].

در شکل (۳)، پرفیل سرعت و تنش برشی یک سیال بینگنهام در حال جریان مابین دو صفحه موازی، صلب، افقی و صاف نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، مقطع جریان سیال بینگنهام به دو بخش تقسیم می شود: بخش جریان لایه صلب و بخش جریان ویسکو پلاستیک. در بخش جریان لایه صلب بدلیل این که تنش برشی کمتر از مقدار تنش تسلیم است، نرخ برش صفر است و تغییر شکل ها معمولاً الاستیک خطی در نظر گرفته می شود. باتوجه به صفر بودن نرخ برش در لایه صلب، سرعت سیال در این بخش ثابت می باشد. در خارج از لایه صلب، تنش برشی بیشتر از تنش تسلیم است و ماده بینگنهام بصورت سیالی با ویسکوزیته ثابت عمل می کند. پارامترهایی چون ویسکوزیته و تنش تسلیم سیال، بازشدگی و زبری درزه و گرادیان فشار بر ضخامت لایه صلب موثرند. باید توجه داشت وقتی تنش برشی در تمام مقطع جریان به زیر تنش تسلیم افت نماید، لایه صلب مرکزی تمام فضای موجود مابین دیواره های درزه را پر کرده و جریان متوقف می شود [۹].



شکل (۳): پرفیل سرعت جریان و تنش برشی سیال بینگنهام، در حین جریان دائم از میان دو صفحه موازی، صلب، افقی و صاف [۹].

۲- نحوه اندازه گیری تنش برشی بوسیله اشل چوبی

ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم (چسبندگی) دوغاب از جمله خواص رئولوژیکی دوغاب های سیمان پایه است که در پروسه تزریق از اهمیت بالایی برخوردار می باشند. این دو پارامتر رابطه بین فشار و نرخ جریان را تحت تاثیر قرار می دهند [۹]. تا کنون بیشتر روش های اندازه



گیری مورد استفاده در سایت، مخروط کیف مارش، تست اسلامپ، استوانه مدرج و صفحه جسیبندگی بوده است [۱۳]. تست اسلامپ بیشتر برای بتن مناسب است اما گاهی اوقات برای همه انواع مواد سیمانی مورد استفاده قرار می گیرد [۱۴].

این روش شامل اشلی است که بر اساس وزنش بر روی آن درجه بندی شده است. به اشلی اجازه داده می شود تا در دوغاب فرو رود و میزان عمقی که فرو رفته اندازه گیری می شود. نتایج بدست آمده با مقاومت برشی اندازه گیری شده از طریق گرانروی سنج مقایسه می شود. برای بهینه کردن مقاومت برشی لازم است تا رابطه ای را بین میزان فرو روی اشلی در دوغاب و مقاومت برشی برقرار کنیم. اجازه می دهیم تا تعادلی بین چوب و دوغابی که اطراف آن را احاطه کرده ایجاد شود. (شکل ۴). معادله تعادل بر اساس روابط زیر بیان می شود: [۲].

نیروی برشی: $1.2\pi.r.\tau_0$

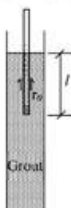
نیروی بالا برنده (ارشمیدس): $l\pi r^2 g\rho_g$

وزن چوب: $m_s.g$

که l میزان فرو روی در دوغاب، r شعاع چوب، τ_0 میزان مقاومت برشی دوغاب، ρ_g دانسیته دوغاب، m_s جرم چوب و g شدت جاذبه است. هنگامی که چوب در دوغاب فرو می رود دوغاب در مقابل فروروی آن مقاومت می کند. در مهندسی ژئوتکنیک (ترزاقی و دوستان ۱۹۹۶)، رابطه جایجایی و جسیبندگی یک توده از زمین، به شکل زیر بیان شده:

$$Q_c = N_c \cdot \tau_0 \cdot A \quad (4)$$

Q_c مقاومت صفحه، N_c فاکتور ظرفیت باربری و A مساحت سطح مقطع است.



شکل (۴): نمایش شماتیک از نحوه انجام آزمایش [۲].

برای حالت دایره ای و با توجه به این که طول فرو روی در دوغاب نسبت به سطح مقطع اشلی بیشتر است، مقدار فاکتور ظرفیت باربری ۹ در نظر گرفته می شود (ترزاقی و دوستان ۱۹۹۶). بنابراین رابطه مقاومت صفحه به صورت زیر بیان می شود:



$$Q_e = 9 \tau_0 \pi r^2 \quad (5)$$

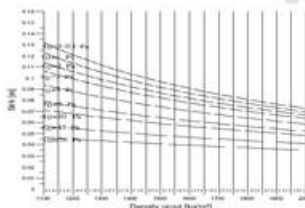
برای تشریح نیروهای مؤثر بر صفحه در حین فرو روی چوب در دوغاب، مجموع نیروهای عمل و عکس العمل بر اساس روابط (۵) به صورت زیر است:

$$12\pi r \tau_0 + 9 \tau_0 \pi r^2 + l\pi r^2 g \rho_g = m_s g \quad (6)$$

حال اگر مقدار مقاومت برشی را از رابطه بالا بدست آوریم، داریم:

$$\tau_0 = \frac{msg - l\pi r^2 g \rho}{12\pi r + 9\pi r^2} \quad (7)$$

در این روش که برای اندازه گیری تنش تسلیم دوغاب در سایت استفاده می شود، در عین حالی که استفاده از آن ساده است دقت بالایی هم دارد. به نظر می رسد که استفاده از اشل برای اندازه گیری تنش تسلیم روشی کاملا مناسب است. اندازه گیری با اشل می تواند در استوانه های مدرجی که امروزه



شکل (۵): نموداری برای تعیین تنش تسلیم با مقادیر مشخص دانسیته دوغاب و میزان نفوذ اندازه گیری شده اشل در دوغاب [۲].

برای آزمایش آب اندازی استفاده می شود انجام گیرد. در واقع نیاز به ساخت وسیله جداگانه ای برای اندازه گیری با اشل نیست. با توجه به این که برای تعیین دانسیته دوغاب در سایت از مد بالانس استفاده می شود، اگر یک اشل استاندارد با قطر و وزن مناسب در دست باشد همه پارامترهای مورد نیاز برای تعیین تنش تسلیم قابل شناسایی است. در شکل (۵) نموداری ارائه شده که بر اساس آن، با استفاده از دانسیته و میزان فرو روی اشل در دوغاب، می توان میزان تنش تسلیم را در سایت تزریق اندازه گیری کرد. در نهایت به نظر می رسد که استفاده از اشل و اجازه دان به فرو روی آن در دوغاب روشی دقیق برای تعیین تنش تسلیم در سایت است. اندازه گیری های استاندارد و دقیق در تهیه دوغاب از قبیل تعیین دانسیته بوسیله مد بالانس، اندازه گیری زمان جریان بوسیله مخروط قیف مارش و اندازه گیری میزان آب اندازی بوسیله



استوانه مدرج، مکمل تعیین تنش تسلیم بوسیله اشل است [۲].

۴- نتیجه

ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم از خواص رئولوژی دوغاب سیمان پایه هستند که رابطه بین فشار و نرخ جریان را تحت تاثیر قرار می دهند. با استفاده از اشل چوبی به راحتی می توان میزان تنش برشی را در سایت تزریق محاسبه کرد. این روش نیاز به وسایل اضافی ندارد و با همان استوانه مدرج و اشل چوبی می توان آن را انجام داد و با توجه به میزان فرو روی اشل در دوغاب و مقایسه آن با نمودارهای استاندارد که در آزمایشگاه تهیه شده در همان لحظه میزان تنش تسلیم دوغاب سیمان پایه را محاسبه کرد و شعاع تاثیر دوغاب را محاسبه نمود.

۵- مراجع

- [1] Rosquoet F; Alexis A.; Khelidj A.; Phelipot A.; "Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation"; cement and concrete research 33, pp. 713-722, 2003.
- [2] Axelsson M., Gustafson G., A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grouts in the field, Tunneling and Underground Space Technology 21, Elsevier, 2007
- [۳] معادیخواه، عباس؛ تحلیل عددی پارامترهای موثر بر پروسه تزریق در محیط های درزه دار سنگی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.
- [4] Eriksson, M., " Prediction of grout spread and sealing effect" Doctoral thesis, KTH, Byggeteknik, 2002.
- [5] Eklund, D.; Stille, H., "Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts", Tunneling and Underground Space Technology, Elsevier, 2007.
- [۶] علوی، سید رسول؛ بررسی خواص دوغاب های سیمانی مورد استفاده در عملیات تزریق؛ سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.
- [7] Hakansson, U.; Hassler L.; Still H., " Rheological properties of cement-based grouts measuring technique", International conference on grouting in rock and concrete, Salzburg, 1993.
- [۸] شیخی نارائی، مجید؛ رئولوژی، برسی خواص، جریان، انتقال حرارت و اختلاط سیلات غیر نیوتنی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۱.
- [9] Amadei, B.; Savage W.Z.; " An analytical solution for transient flow of Bingham viscoplastic materials in rock fractures" In. J. Rock mech&Min. Sic, 38(2), PP. 285-296, 2001.
- [10] Nonviller, E.; " Grouting Theory and Practice", Amsterdam , Elsevier, 1989.
- [11] Lombardi, G.; "Grouting of rock masses" 3RD International conference on Grouting and Grout Treatment, Minusio, 2003.
- [12] Krizek, R.J.; Swarz, L.G.; Pepper, S.F., " Bleed and rheology of cement grouts" , International conference of grouting in rock and concrete, Sulzburg, 1993.
- [13] Kutzner, c., "Grouting of Rock and soil" Balkema, Rotterdam, Netherlands., 1996.
- [14] Weaver, K., " Dam Foundation grouting", American Society of civil engineers (ASCE), New York., 1991.