

تحلیل عددی حجم محدود تأثیر هندسه درز بر تغییرات سرعت دوغاب با ویسکوزیته متغیر، تحت رژیم جریان آشفته‌ی ناپایا

مصطفی شریف‌زاده^{۱*}؛ جعفر خانی^۲؛ زیور جنتی‌ا قدم^۳؛ مجید احمدلوی داراب^۴

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران. Sharifzadeh@aut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۴- دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

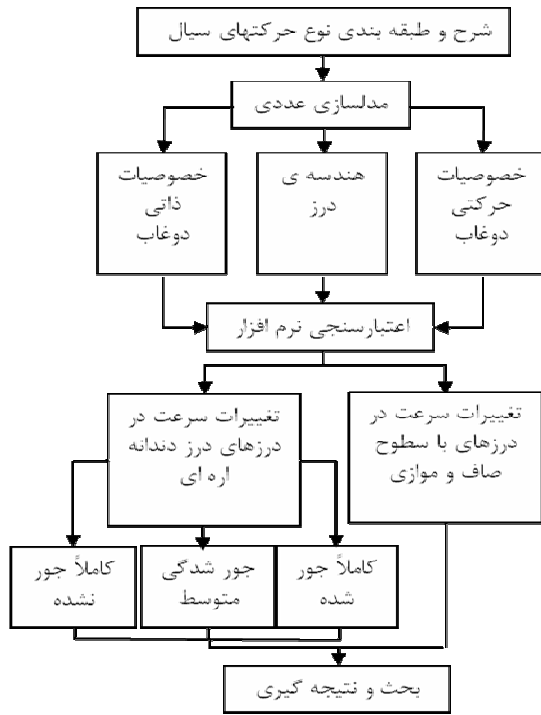
(دریافت ۹ بهمن ۱۳۸۷، پذیرش ۱۷ مرداد ۱۳۸۸)

چکیده

آمیزه تزریق با یک سرعت اولیه وارد درز می‌شود اما بسته به هندسه درز و خصوصیات دوغاب تزریقی، دوغاب به تدریج سفت شده و سرعت تغییرات کاملاً آشکاری از خود نشان می‌دهد. این تغییرات در راستای تزریق و عمود بر راستای تزریق رخ می‌دهد. در این تحقیق تغییرات هر دو مؤلفه سرعت در درزهایی با هندسه‌های گوناگون، با استفاده از اصول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش عددی حجم محدود بررسی شده است. بدین منظور درزهایی با سطوح صاف و موازی و همچنین درزهایی دندانه‌اره‌ای شکل با جورشدگی‌های متفاوت مدل‌سازی شدند. نتایج نشان می‌دهد که مؤلفه سرعت در راستای تزریق در یک درز با سطوح صاف و موازی همواره توزیع سهمی شکلی در جهت بازشدگی درز از خود نشان می‌دهد. در درز دندانه‌اره‌ای شکل، در محل‌های تنگ شده مقدار آن افزایش می‌یابد و پروفیل آن از حالت سهمی شکل خارج شده و شکل موجی به خود می‌گیرد. سرعت در راستای عمود بر امتداد درز درون درزهای با سطوح صاف و موازی از ورودی درز تا محلی که دوغاب شروع به گیرش می‌کند برابر صفر است و از محل گیرش دوغاب به بعد آشکار شده و تغییر می‌کند. این مؤلفه از سرعت در درزهایی با سطوح دندانه‌اره‌ای از ابتدای درز غیرصفر بوده و چگونگی تغییرات آن از نظر مقدار و علامت به میزان جورشدگی درز و نسبت بازشدگی درز (K)، جهت و شیب دیواره‌های درز بستگی دارد.

کلمات کلیدی

دینامیک سیالات محاسباتی، حجم محدود، درز سنگی، جورشدگی، تزریق، مؤلفه‌های سرعت دوغاب.



شکل ۱: الگوریتم کلی مقاله

بدون ویسکوزیته است. در جریان‌های بدون ویسکوزیته همواره ویسکوزیته برابر صفر است. این گونه جریان‌ها در طبیعت وجود ندارند ولی در بسیاری از مسائل ویسکوزیته برابر صفر فرض می‌شود تا آنالیز آن مسائل آسان گردد که البته نتایج حاصله دور از واقعیت خواهد بود. دوغاب سیمانی تزریق نیز از جمله سیالاتی است که نه تنها دارای ویسکوزیته اولیه است بلکه ویسکوزیته آن بعد از تزریق و با گذشت زمان افزایش می‌یابد و عبارتی سفت می‌شود. در نتیجه مطالعه جریان‌های با ویسکوزیته اهمیت ویژه‌ای دارند.

سرعت سیال در تماس با سطح جامد محکم همواره صفر است ولی سایر قسمت‌های حجم سیال در حال حرکت هستند. بنابراین ضریب زاویه سرعت و در نتیجه تنش برشی بین لایه‌های سیال وجود دارد و این تنش برشی در حرکت سیال و سرعت بخش‌های مختلف آن تأثیر اساسی دارد.

شکل ۲ توزیع سرعت در مکان‌های مختلف واقع بر صفحه را نشان می‌دهد. دو مکان با طول‌های x_1 و x_2 روی شکل مشخص شده‌اند. در فاصله x_1 نقطه A بین سیال و صفحه، لغزش وجود ندارد پس در آنجا سرعت برابر صفر خواهد بود.

۱- مقدمه

تزریق به منظور افزایش بهم فشردگی خاک‌ها و سنگ‌های خرد شده (برای افزایش مقاومت، تحکیم و جلوگیری از نشست) و نیز به منظور کاهش نفوذپذیری آن‌ها (جهت جلوگیری از تراوش آب‌های نفوذی به داخل تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی) به کار می‌رود.

جهت درک جریان در یک توده سنگ فهم مبانی جریان در یک درز منفرد لازم است [۱،۲]. حرکت دوغاب درون درزهای سنگی با حرکت یک سیال بینگه‌امی درون یک مجرا شبیه سازی می‌شود. سرعت سیال در درز یک پارامتر بسیار مهم در دینامیک سیالات محسوب می‌شود که تا حد قابل توجهی به هندسه و تغییرات بازشدگی درز بستگی دارد.

در عمده تحقیقات گذشته [۳ تا ۷] پارامتر بازشدگی ثابت و معادل بازشدگی هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شد در حالی که در طبیعت در یک تک درز بازشدگی تغییر می‌کند. در این تحقیق درزهایی با بازشدگی‌های ثابت و متغیر مدلسازی و تأثیر هندسه درز بر چگونگی تغییرات سرعت دوغاب درون آن در حین تزریق بررسی شده است.

برای بررسی مسائل تزریق می‌توان از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی استفاده کرد. از آنجا که روش‌های تحلیلی و تجربی اغلب در محیط پیوسته یا پیوسته معادل قابل کاربرد هستند، لذا برای تحلیل جریان سیال و تخمین میزان نفوذ آن در درز های سنگی روش عددی انتخاب شد. مهم‌ترین امتیاز یک پیشگویی محاسباتی هزینه پایین آن است. در بیشتر کاربردها هزینه به کار بردن یک برنامه کامپیوتری به مراتب کمتر از مخارج تحقیق آزمایشگاهی مشابه است.

در این مقاله ابتدا توضیح مختصری در رابطه با حرکت سیال آورده شده است. در ادامه مراحل مدلسازی برای تحلیل مسأله شرح داده شده و یک مثال عددی برای نشان دادن کارایی این روش در مسائل تزریق ارائه شده و پس از آن به بررسی و تحلیل تأثیرات هندسه درز بر تغییرات سرعت دوغاب پرداخته شده است. شکل ۱ روند مطالعه در بخش‌های مختلف این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲- شرح و طبقه بندی نوع حرکت‌های سیال

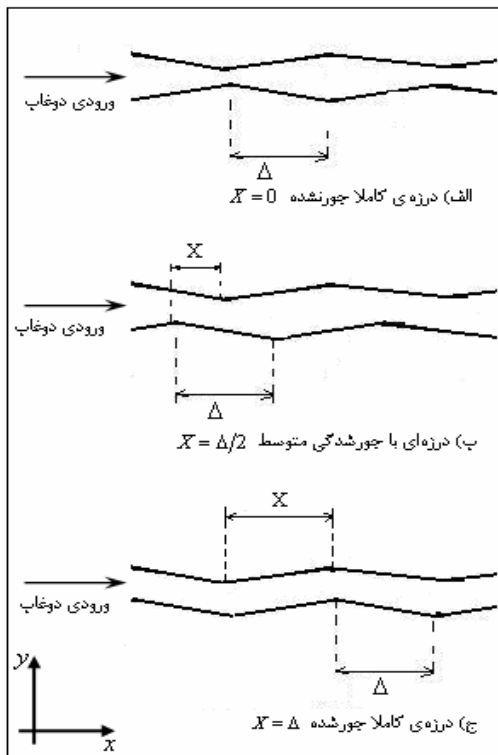
یکی از تقسیم بندی‌های کلی در رابطه با نوع حرکت سیالات، تقسیم آن به حرکت سیالات با ویسکوزیته و حرکت سیالات

درزهایی به شکل دندان اره‌ای مطابق شکل ۳ ساخته شد. مدلسازی در دو بعد و با مش بندی مربعی انجام گرفت. سطوح بالایی و پایینی درز کاملاً غیر قابل نفوذ در نظر گرفته شدند. برای ایجاد چنین هندسه‌هایی می‌توان از یکی از نرم افزارهای گروه CAD استفاده کرد.

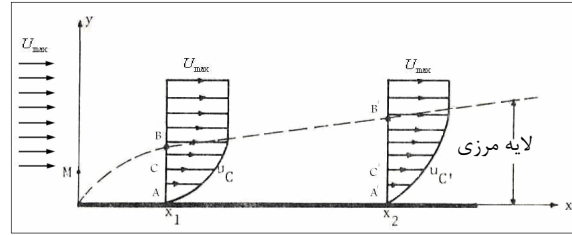
در درزه‌های دندان اره‌ای (حالت جورنشده) برای بررسی تغییرات بازشدگی، نسبت بازشدگی حداقل در محل تنگ شدگی به بازشدگی حداکثر در محل گشادشدگی (d_{min}/d_{max}) با علامت K و تحت عنوان نسبت بازشدگی درز تعریف می‌شود.

۳-۲- خصوصیات دوغاب

رفتار رئولوژیکی دوغاب‌های سیمانی بسیار پیچیده است. دوغاب در اثر بر هم کنش میان دو فاز جامد و مایع و میان ذرات خود ممکن است غیر نیوتنی، تیکسوتروپی و دارای تنش تسلیم باشد. رفتار دوغاب تحت تأثیر هیدراسیون سیمان است و ناگزیر با گذشت زمان تغییراتی در ویژگی‌های دوغاب ایجاد می‌شود [۸]. رفتار رئولوژیکی به عواملی چون زمان سپری شده از هم زدن دوغاب، دما و سرعت جریان بستگی دارد [۹]. رئولوژی نقش مهمی در تزریق دارد؛ زیرا رابطه‌ی میان فشار و آهنگ جریان را تعیین می‌کند. تنش تسلیم، شعاع نفوذ دوغاب را محدود خواهد کرد [۱۰].



شکل ۳: مدل هندسی از درزهایی با جورشدگی‌های مختلف



شکل ۲: پروفیل‌های سرعت برای یک جریان سیال ویسکوز

چون صفحه ثابت است لذا نیروی کند کننده‌ای به جریان وارد می‌کند که جریان سیال را در همسایگی مرز صفحه کند می‌کند. پس در امتداد محور y ها به اندازه کافی دورتر از صفحه مثلاً نقطه B جریان دیگر تحت تأثیر صفحه واقع نخواهد شد. مطابق پروفیل فرض می‌کنیم که سرعت به آرامی و بطور یکنواخت از $u = 0$ در نقطه $y = 0$ به $U = U_{max}$ در نقطه $y = y_B$ افزایش می‌یابد.

در مکان x_1 چون لایه‌هایی که سرعت آن‌ها کندتر است نیروهای کند کننده‌ای به لایه‌هایی که سرعت آن‌ها بیشتر است وارد می‌کنند، لذا بعد از مسافتی دورتر از x_1 یعنی نقطه x_2 لازم است که $y_{B'} > y_B$ شود تا سرعت دو نقطه B و B' با هم برابر باشد. در نتیجه لازم است که داشته باشیم $U_{C'} < U_C$ که سرعت لایه سیال در نقطه C در فاصله x_1 و $U_{C'}$ سرعت لایه سیال در نقطه C' در فاصله x_2 است. توجه شود که $y_{C'}$ با y_C برابر است.

بطور کلی از تصویر کیفی میدان جریان، مشاهده می‌کنیم که جریان را به دو ناحیه کلی می‌توان تقسیم کرد:

۱. ناحیه‌ای از لایه‌ها که نزدیک به مرز صفحه است و در آن لایه تنش برشی وجود دارد که اصطلاحاً به این ناحیه، لایه مرزی گویند.

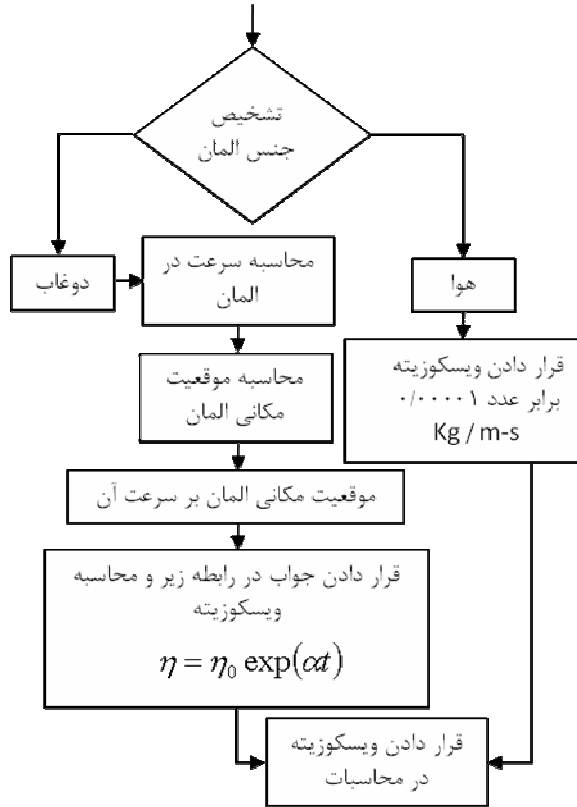
۲. ناحیه خارج از لایه مرزی که ضریب زاویه سرعت همواره صفر بوده و تئوری‌های مربوط به سیال غیر ویسکوز برای محاسبات قابل اعمال است.

جریانی که بالاتر از لایه مرزی است دارای سرعتی معادل U_{max} است. شواهد نشان می‌دهد که مطالعه جریان دوغاب در درز سنگی بعنوان جریان یک سیال ویسکوز با ویسکوزیته متغیر نسبت به زمان فقط با استفاده از روش‌های عددی امکان پذیر باشد که در بخش‌های بعدی تشریح می‌شود.

۳- مدلسازی عددی حرکت دوغاب در درز

۳-۱- مدلسازی هندسه درز

برای بررسی تأثیر هندسه درز بر تغییرات سرعت دوغاب در حین تزریق، درزه‌های منفردی با سطوح صاف و موازی و نیز



شکل ۴: فلوجارت زیربرنامه اعمال تغییرات ویسکوزیته در جریان تزریق

اساس مدل $k - \mathcal{E}$ استاندارد، معادلات حرکتی برای انرژی سینتیک آشفتگی (k) و آهنگ تلفات آن (\mathcal{E}) است. معادله حرکتی برای انرژی سینتیک آشفتگی از حل دقیق به دست آمده است در حالی که معادله حرکتی برای \mathcal{E} با استدلال فیزیکی و استفاده از حل دقیق ریاضی موارد مشابه به دست آمده است.

انرژی سینتیک آشفتگی k و نسبت تلفات آن \mathcal{E} از معادلات حرکتی زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \mathcal{E} - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathcal{E}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mathcal{E} u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\mathcal{E}} \right) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right] + C_{1\mathcal{E}} \frac{\mathcal{E}}{k} (G_k + C_{3\mathcal{E}} G_b) - C_{2\mathcal{E}} \rho \frac{\mathcal{E}^2}{k} + S_\mathcal{E} \quad (3)$$

$$+ C_{1\mathcal{E}} \frac{\mathcal{E}}{k} (G_k + C_{3\mathcal{E}} G_b) - C_{2\mathcal{E}} \rho \frac{\mathcal{E}^2}{k} + S_\mathcal{E}$$

با بررسی روند تغییرات ویسکوزیته دوغاب پس از تزریق با گذشت زمان در مقایسه با ویسکوزیته اولیه آن در زمان تزریق رابطه زیر پیشنهاد شد:

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha t) \quad (1)$$

که در این رابطه: η ویسکوزیته دوغاب بعد از گذشت زمان t ؛ η_0 ویسکوزیته اولیه دوغاب؛ t زمان و α ثابتی از ماده است که بر اساس خواص دوغاب و شرایط فنی انتخاب می‌شود [۲]. با توجه به اینکه در نرم افزار تحلیل گر مسئله (فلوئنت)، کلیه انعطاف پذیری‌ها و توانایی‌های لازم برای نوشتن زیربرنامه وجود دارد؛ در این تحقیق یک زیربرنامه برای اعمال کردن آهنگ تغییرات ویسکوزیته نوشته شد. شکل ۴ الگوریتم و مراحل عملیاتی این زیربرنامه را نشان می‌دهد.

الگوریتم نشان داده شده در شکل ۴ برای هر یک از اجزای درز در تمامی مراحل حل فراخوانی می‌شود تا ویسکوزیته‌ی لحظه‌ای برای هر جزء موجود در داخل درز (دوغاب یا هوا) به دست آید. همانطور که در شکل ۴ آمده است؛ در ابتدا جنس جزء تشخیص داده می‌شود با توجه به اینکه ویسکوزیته هوا ثابت است؛ با تشخیص هوا برای هر جزء ویسکوزیته‌ای برابر با 0.00001 kg/m-s به آن اختصاص داده می‌شود. اما زمانی که جنس جزء، دوغاب تشخیص داده شد مراحل زیربرنامه به شرح زیر اجرا می‌شود:

ابتدا سرعت متوسط برای آن جزء و پس از آن موقعیت مکانی نقطه مرکزی جزء به دست می‌آید؛ با تقسیم موقعیت مکانی جزء بر سرعت متوسط آن، مدت زمانی که از تزریق دوغاب به آن جزء گذشته حاصل می‌شود. با قرار دادن زمان حاصله در رابطه ۱، مقدار ویسکوزیته دوغاب در همان لحظه برای جزء مورد بررسی به دست می‌آید؛ همانطور که گفته شد این کار برای همه اجزا در تمامی مراحل حل تکرار می‌شود.

۳-۳- مدلسازی ویژگی‌های حرکتی دوغاب

با توجه به اینکه در عمل، تزریق با فشار بالا انجام می‌شود؛ جریان دوغاب به صورت آشفته و ناپایا است. در غالب روابط مرسوم در فرایند تزریق از قانون داریسی استفاده شده است که از مهم‌ترین شرایط برای برقراری آن داشتن جریان آرام، موازی و لایه‌ای است. بنابراین در این تحقیق برای تحلیل تأثیر آشفتگی از مدل نیمه تجربی $k - \mathcal{E}$ استاندارد استفاده شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (5)$$

که X مختصات محوری و u سرعت محوری و S_m جرم اضافه شده است. رابطه ۵ یک شکل کلی از معادله بقای جرم است. معادله بقای مومنت در جهت i به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (6)$$

که p فشار استاتیک، τ_{ij} تانسور تنش، ρg_i و F_i نیروهای جسمی گرانشی و جسمی خارجی در جهت i است. تانسور تنش τ_{ij} نیز به صورت زیر است:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (7)$$

که μ لزجت مولکولی و ترم دوم در سمت راست تأثیرپذیری ناشی از انبساط حجمی است.

۴- مثال عددی برای اعتبار سنجی نرم افزار

به منظور بررسی صحت مدل عددی از داده‌های تجربی ارائه شده در منبع شماره [۷] استفاده شد. بدین منظور مدل‌هایی مشابه از نظر شرایط هندسی درز و شرایط فنی تزریق ساخته شد و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شد.

در این مدل دوغاب تحت فشارهای مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلوپاسکال) به درز تزریق شد و با اعمال تغییرات ویسکوزیته و آشفتگی و ناپایا بودن جریان در مدلسازی (نزدیک سازی شرایط مدلسازی به شرایط واقعی تزریق) تطابق قابل توجهی بین نتایج تجربی و نتایج عددی مشاهده شد (شکل ۵).

۵- نتایج مدلسازی عددی

برای بررسی تغییرات سرعت در درز؛ سرعت به دو مؤلفه شامل در راستای تزریق و عمود بر راستای تزریق تجزیه شد. در کلیه مدل‌های ساخته شده که در بخش ۳-۱ (شکل ۳) تشریح شدند؛ دوغاب یکسانی تزریق شد و تغییرات هر دو مؤلفه سرعت در حالات مختلف بررسی شد که نتایج حاصله در زیر آمده است:

در معادلات ۲ و ۳، G_k انرژی سینتیک آشفتگی ناشی از گرادیان‌های اصلی سرعت، G_b انرژی سینتیک آشفتگی ناشی از غوطه وری، Y_m سهم اتساع نوسانی در آشفتگی مترامک شونده به نرخ تلفات کل را نشان می‌دهند. $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ اعداد ثابتی هستند و σ_k و σ_ϵ اعداد پراوتل آشفتگی برای k و ϵ هستند. S_k و S_ϵ نیز پارامترهایی هستند که توسط کاربر تعریف می‌شوند. μ_t ویسکوزیته آشفتگی است که از رابطه ۴ به دست می‌آید [۱۱]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

مدل $k-\epsilon$ روی عملکردهایی که بر روی انرژی سینتیک آشفتگی اثر می‌گذارند متمرکز شده است. انرژی سینتیک آشفتگی ناشی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت است و غیرصفر بودن آن به معنای غیر صفر بودن حداقل یکی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت است. با توجه به اینکه آشفتگی، ایجاد کننده مؤلفه‌های نوسانی سرعت است؛ می‌توان گفت که غیر صفر بودن k معادل با آشفتگی جریان است و مقدار آن نیز معیاری از شدت آشفتگی به شمار می‌آید. تولید و اتلاف انرژی جنبشی آشفته همواره به یکدیگر مربوط هستند یعنی اگر k سریعاً رشد کند ϵ هم سریعاً رشد می‌کند و با کاهش k به اندازه کافی سریعاً کاهش می‌یابد تا از مقادیر منفی انرژی جنبشی آشفته اجتناب شود.

۳-۴- روش حل مساله

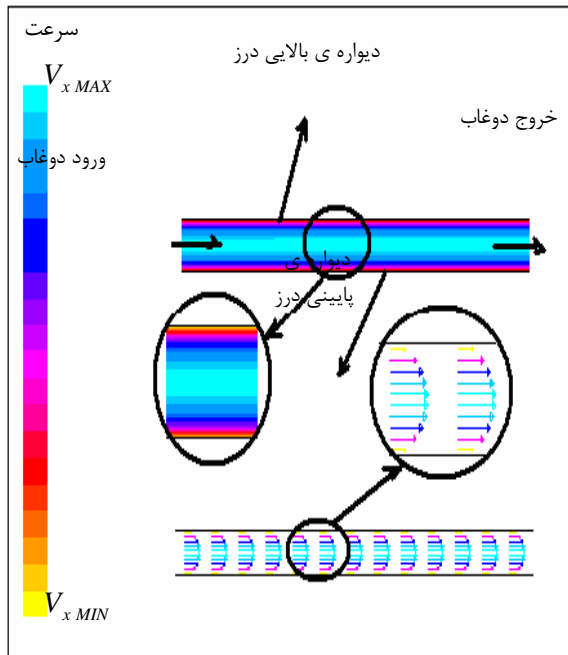
برای حل مساله از روش حجم محدود به کمک نرم افزار فلوئنت استفاده شد؛ الگوریتم روش مذکور شامل مراحل زیر است:

- انتگرال گیری عددی از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم‌های کنترل مربوط به میدان حل.
- گسسته‌سازی که شامل جایگذاری نوعی از تقریب‌های تفاضل محدود برای عبارت‌های داخل معادله‌ی انتگرالی است و فرآیندهای جریان را نشان می‌دهد. این عمل معادلات انتگرالی را به یک سیستم از معادلات جبری تبدیل می‌کند.
- حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار.

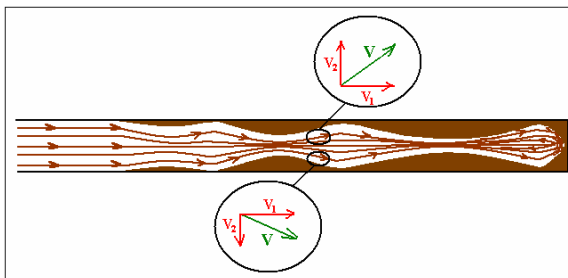
قدم اول، یعنی انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) متمایز می‌کند.

در روند تحلیل مساله معادلات بقای جرم و مومنت حل شدند؛ معادله بقای جرم یا پیوستگی، به صورت زیر نوشته می‌شود:

سرعت تأثیر دارد. جدول ۱ مقادیر بیشینه‌ی هردو مؤلفه‌ی سرعت را به ازای فشارهای تزریق ۲۰، ۴۰ و ۵۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد.



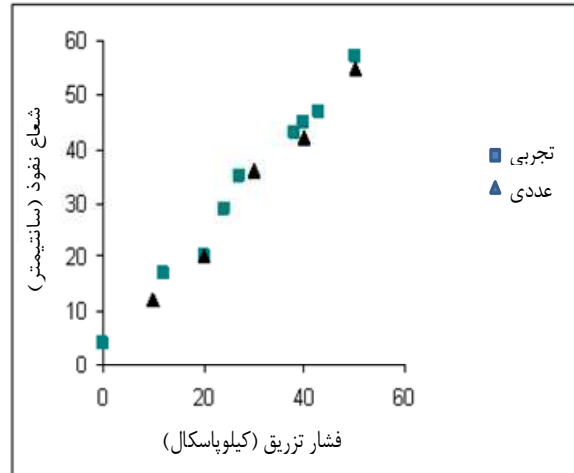
شکل ۶: کنتورها و پروفیل سرعت در امتداد جریان (جهت X) درون یک درز با صفحات صاف و موازی



شکل ۷: گیرش دوغاب و ظاهر شدن مؤلفه عمود بر امتداد تزریق سرعت در درز با سطوح صاف و موازی

جدول ۱: تغییرات سرعت ماکزیمم دوغاب با تغییرات فشار تزریق

فشار (Kpa)	۲۰	۴۰	۵۰
$V_{xMAX} (m/s)$	۲/۶۵	۲/۹۴	۳/۰۴
$V_{yMAX} (m/s)$	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۳۸

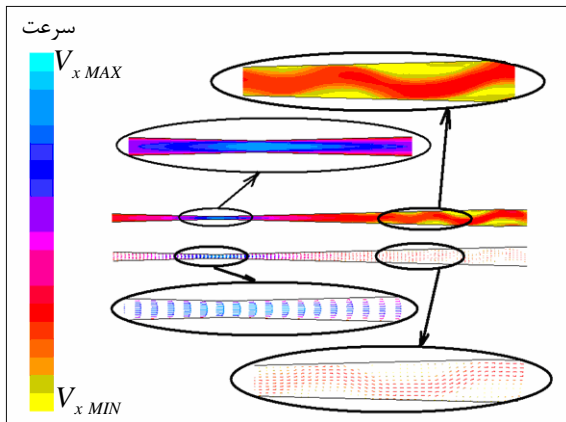


شکل ۵: مقایسه تغییرات شعاع تزریق با فشار تزریق، حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج تجربی

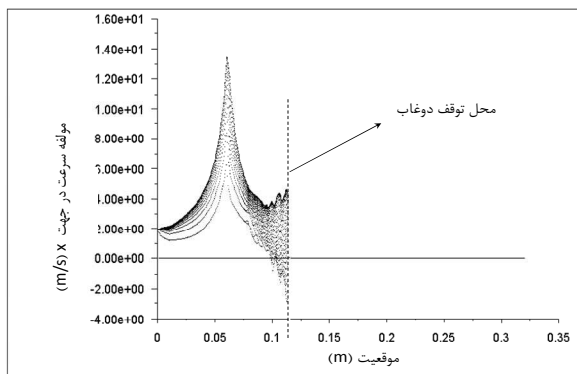
۵-۱- تغییرات سرعت در درزه ای با سطوح صاف و موازی
ابتدا به بررسی سرعت در راستای تزریق درون یک درز با سطوح صاف و موازی پرداخته می‌شود. شکل ۶ کنتورها و پروفیل سرعت در امتداد تزریق را برای حرکت دوغاب داخل یک درز با سطوح صاف و موازی نشان می‌دهد. با توجه به نیروی برشی که از طرف دیواره‌های درز به دوغاب وارد می‌شود؛ سرعت در مجاورت دیواره‌ها حداقل مقدار خود را دارد و با حرکت به سمت محور مرکزی درز و کاهش نیروی برشی (تأثیر دیواره‌ها) مقدار سرعت افزایش می‌یابد. به طوری که در محور مرکزی درز سرعت ماکزیمم مقدار خود را داراست. این امر منجر به ایجاد یک پروفیل سهمی شکل برای سرعت در امتداد بازشدگی درز می‌شود که در شکل ۶ نشان داده شده است. در عملیات تزریق، سرعتی که در ابتدای درز به دوغاب داده می‌شود در راستای تزریق است. بنابراین برای ایجاد سرعت در امتداد عمود بر راستای تزریق، عامل دیگری لازم است. این عامل ممکن است تغییرات مسیر حرکت (ناشی از تغییرات هندسه درز) باشد. در یک درز با سطوح صاف و موازی مؤلفه‌ی سرعت در امتداد عمود بر تزریق تا محلی که دوغاب شروع به گیرش کند برابر صفر است ولی از آن پس، مقدار آن تغییر می‌کند و در طول مسیر مرتباً جهت آن عوض می‌شود. زیرا گیرش تدریجی دوغاب، یکنواختی شکل درز را از بین می‌برد. فشار اولیه‌ی تزریق به طور مستقیم با سرعت در راستای تزریق و به طور غیرمستقیم با سرعت در امتداد عمود بر راستای تزریق رابطه دارد. بنابراین تغییر آن بر مقدار هر دو مؤلفه‌ی

برابر و ماکزیمم مقدار سرعت است. در هر دو شکل در محل- های تنگ شده مقدار سرعت افزایش می‌یابد. در شکل ۹ که در آن نسبت بازشدگی کمتر است نسبت به شکل ۱۰ این افزایش شدید تر است (تقریباً دو برابر).

این روند تغییرات سرعت که ناشی از قانون پیوستگی جریان است بر جورشدگی‌های مختلف نیز حاکم است. یعنی در قسمت‌های تنگ شده سرعت بیشترین مقدار خود را دارد و با افزایش مقدار تنگ شدگی مقدار افزایش سرعت، بیشتر می‌شود.



شکل ۸: کنتورها و پروفیل سرعت در امتداد تزریق (جهت X) در درز دندانه اره‌ای جورنشده



شکل ۹: نمودار تغییرات در طول درز دندانه اره‌ای جورنشده به ازای نسبت تنگ شدگی ۰/۱۷

۵-۲- تغییرات سرعت دوغاب در درزی دندانه اره‌ای به ازای جورشدگی‌های مختلف

ناپیوستگی‌ها در طبیعت به دلایل مختلفی از قبیل جابجایی برشی، هوازدگی و فرسایش جورشدگی خود را از دست می‌دهند. درز جور شده به درزی گویند که با اعمال تنش عمودی بسته می‌شود و صفحات آن بر هم منطبق هستند. درزهای جورنشده به دلیل عدم انطباق با اعمال تنش عمودی بسته نمی‌شوند و حتی در تنش‌های عمودی بالا نیز مقداری بازشدگی از خود نشان می‌دهند.

برای بررسی تغییرات سرعت دوغاب در درزی با صفحات دندانه اره‌ای و جورشدگی‌های مختلف، درزهایی دندانه اره‌ای با جورشدگی‌های حداقل، متوسط و حداکثر مطابق شکل ۳ مدلسازی شدند. همانطور که از شکل مشخص است در این درزها بازشدگی متغیر بوده و نمی‌توان یک بازشدگی ثابت برای آن‌ها متصور شد. در این حالت تغییرات سرعت دوغاب با حالتی که تزریق در یک درز با صفحات صاف و موازی انجام می‌شود، فرق دارد.

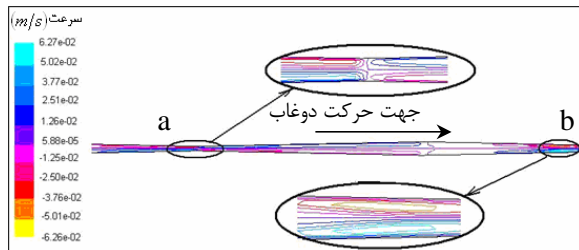
ابتدا تغییرات سرعت در راستای تزریق برای درزهای با حداقل جورشدگی یعنی $X = 0$ بررسی می‌شود:

شکل ۸ کنتورها و پروفیل مؤلفه‌ی سرعت در راستای تزریق را برای یک درز دندانه اره‌ای جورنشده در محل تنگ شدگی نشان می‌دهد.

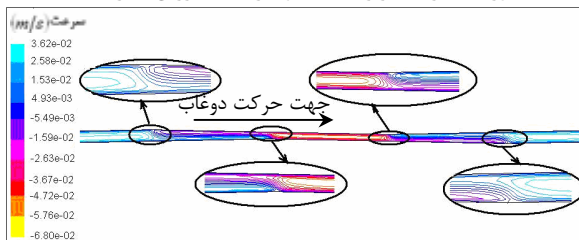
در محل تنگ شده، سرعت افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند در حالی که در قسمت‌های بازشده، دوغاب تمایل به ایجاد همان وضعیتی دارد که در درزهای با سطوح صاف مشاهده شد. این بدلیل قانون پیوستگی جریان است به طوری که با کاهش سطح مقطع عبور جریان، سرعت آن افزایش می‌یابد. محل تنگ شده همانند یک دریچه‌ی لب تیز عمل می‌کند به طوری که بردارهای سرعت دوغاب در حین خروج از آن متقارب هستند و در نتیجه پروفیل‌های سرعت هنگام خروج از محل گلوگاه حالت موجی به خود می‌گیرند و در قسمت‌های خارج از این موج، سرعت مقدار صفر را نشان می‌دهد. این موضوع را در پروفیل سرعت نیز به وضوح می‌توان دید؛ در این مناطق طول بردارها نشان می‌دهند که سرعت به صفر میل کرده است.

افزایش تنگ شدگی یا به عبارت دیگر کاهش نسبت K باعث افزایش سرعت ماکزیمم و کاهش مینیمم سرعت یا به عبارت بهتر پراکندگی بیشتر مقدار سرعت می‌شود. اشکال ۹ و ۱۰ تغییرات سرعت در راستای تزریق را در طول درز به ازای تغییرات $K = 0.17$ و $K = 0.34$ نشان می‌دهد. تفاوت اصلی بین دو شکل ۹ و ۱۰ در پراکندگی سرعت در نقاط دارای موقعیت طولی

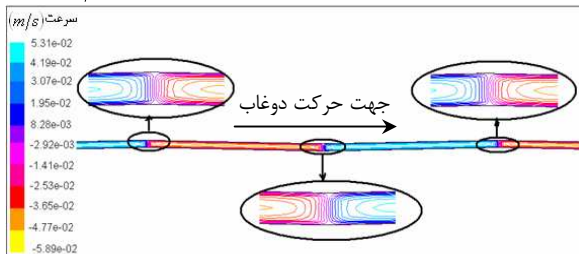
درز (مقطعی در راستای بازشدگی) همواره سرعت‌ها در راستای عمود بر امتداد تزریق (با توجه به اینکه شیب دیواره های بالایی و پایینی همواره قرینه یکدیگرند) دارای علامت‌های متضاد هستند و با رسیدن به قسمت تنگ شده وضعیت قرینه می‌شود در حالی که در حالت $X = \Delta$ در چنین مقطعی از درز تمامی سیال در راستای عرضی فقط در یک جهت حرکت میکند و تمامی آن به یکباره تغییر علامت می‌دهد.



الف) کنتورهای سرعت در راستای عمود بر امتداد تزریق به ازای $X = 0$



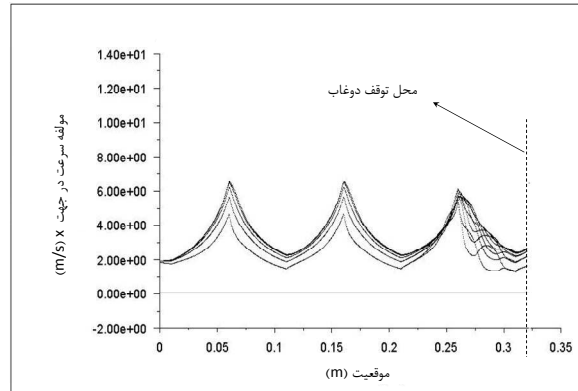
ب) کنتورهای سرعت در راستای عمود بر امتداد تزریق به ازای $X = \Delta/2$



ج) کنتورهای سرعت در راستای عمود بر امتداد تزریق به ازای $X = \Delta$

شکل ۱۱: تغییرات کنتورهای سرعت در درزهای دندانه اره‌ای با جورشدگی‌های مختلف

همانطور که پیشتر نیز به آن اشاره شد؛ علاوه بر شیب دیواره‌ها نسبت تنگ‌شدگی درز نیز بر مؤلفه‌ی عمود بر راستای تزریق سرعت همانند مؤلفه‌ی در راستای تزریق سرعت تأثیر دارد. علامت سرعت تابع شیب دیواره و مقدار آن تابع بازشدگی درز است. نمودار شکل ۱۲ تغییرات سرعت حرکت دوغاب در جهت عمود بر راستای تزریق را در درزی دندانه اره‌ای به ازای $K = 0/17$ و نمودار شکل ۱۳ تغییرات را به ازای $K = 0/34$ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات در طول درز دندانه اره‌ای جورنشده به ازای نسبت تنگ‌شدگی $0/34$

مؤلفه‌ی دیگر سرعت یعنی سرعت در راستای عمود بر امتداد تزریق علاوه بر تأثیر پذیری از تغییرات بازشدگی، با توجه به تغییر علامت شیب مسیر به طور متناوب تغییر علامت می‌دهد. شکل ۱۱ تغییرات مؤلفه عمود بر راستای تزریق سرعت را به ازای جورشدگی‌های مختلف نشان می‌دهد. قسمت الف این تغییرات را به ازای $X = 0$ (جورنشده) نشان می‌دهد. در محل تنگ‌شدگی مقدار سرعت در امتداد عمود بر راستای تزریق افزایش می‌یابد و علاوه بر آن علامت سرعت‌ها که نشانگر جهت سرعت است؛ به دلیل تغییر شیب دیواره قرینه می‌شود. با توجه به بخش a قسمت الف شکل ۱۱، در قسمت تنگ شده تغییر علامتی کاملاً آبی مشاهده می‌شود به طوری که قسمت‌های با سرعت روبه بالا (علامت مثبت)، رو به سمت پایین (علامت منفی) و قسمت‌های با سرعت رو به پایین، سرعتی رو به سمت بالا پیدا می‌کنند. بخش b نشانگر محلی است که دوغاب در آن متوقف می‌شود؛ در این قسمت مقدار این مؤلفه سرعت به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد.

قسمت ب این تغییرات را به ازای $X = \Delta/2$ (جورشدگی متوسط) نشان می‌دهد. ابتدا سرعت دارای علامت مثبت است که پس از طی مسیری، تقریباً نیمی از آن تغییر علامت داده و علامت منفی به خود می‌گیرد و پس از طی مسیری کل مقطع دارای سرعت منفی می‌شود. این تغییرات ناشی از تغییرات شیب دیواره‌ها است و روندی تکرار شونده دارد.

قسمت ج این تغییرات را به ازای $X = \Delta$ (جورشده) نشان می‌دهد. در این حالت مناطق تبدیل سرعت بسیار واضح است و تغییرات سرعت آنی‌تر اتفاق می‌افتد. این شکل از جهت تغییرات آبی شبیه به شکل قسمت الف است؛ اما توجه به این نکته ضروری است که در حالت $X = 0$ در یک مقطع عرضی

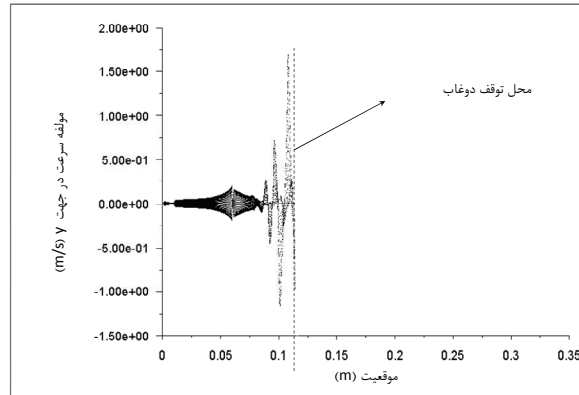
دندان‌اره‌ای شکل با جورشدگی‌های حداکثر، متوسط و حداقل ساخته شدند. از مطالعات انجام شده نتایج قابل توجهی به شرح زیر بدست آمده است:

درون درزهایی با سطوح صاف و موازی، پروفیل مؤلفه در امتداد تزریق سرعت کاملاً سهمی شکل است. علت این پدیده اعمال نیروهای برشی از سمت دیواره‌های درز به سیال است. مؤلفه عمود بر امتداد تزریق سرعت در این نوع درزها از شروع تزریق تا آغاز گیرش دوغاب صفر است. در اثر گیرش دوغاب موانعی شکل می‌گیرند که سبب بوجود آمدن این مؤلفه از سرعت می‌شود. در محل توقف دوغاب درون این نوع درزها مؤلفه عمود بر امتداد تزریق سرعت به حداکثر مقدار خود و مؤلفه در امتداد تزریق سرعت به حداقل مقدار خود می‌رسد.

مهم‌ترین اهداف در مدلسازی درزه‌های دندان‌اره‌ای شکل با جورشدگی‌های مختلف، اعمال تغییرات بازشدگی درز و تغییر جهت حرکت دوغاب است. در درزه‌های دندان‌اره‌ای شکل با نزدیک شدن به محل تنگ شدگی مؤلفه در امتداد تزریق سرعت افزایش شدیدی می‌یابد و پروفیل آن نیز حالت موجی به خود می‌گیرد و با رسیدن به محل‌های باز شده درز، حالت موجی محو می‌شود. با کاهش نسبت K پراکنندگی مقادیر سرعت در نقاطی با مختصات طولی یکسان، افزایش پیدا می‌کند.

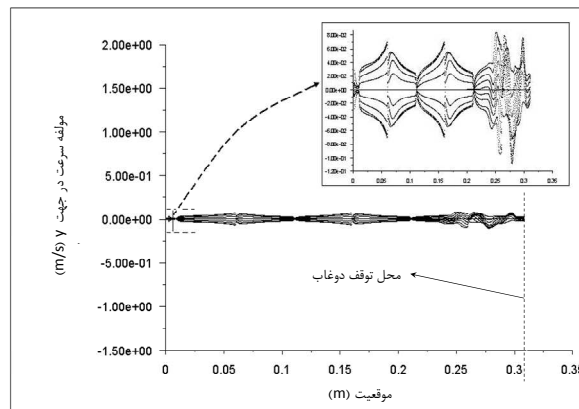
مؤلفه عمود بر امتداد تزریق درون درزه‌های دندان‌اره‌ای شکل علاوه بر تغییرات بازشدگی، تحت تأثیر تغییر شیب دیواره‌ها نیز قرار می‌گیرد. در این گونه درزها نیز در محل توقف دوغاب این مؤلفه از سرعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در درزهایی با جورشدگی‌های حداقل دیواره‌های درز دارای شیب‌های متقارن هستند و در نتیجه مؤلفه عمود بر امتداد تزریق در بخش‌های بالایی و پایینی درز و در نزدیکی دیواره‌ها دارای علامت‌های متقارن هستند. در محل عبور از تنگ شدگی درز به محل باز شده درز، تغییر علامت آنی در این مؤلفه از سرعت مشاهده می‌شود. با گذر از شرایط درز دندان‌اره‌ای شکل با جورشدگی حداقل به حالت‌های جورشدگی متوسط و حداکثر، این تغییرات روندی را ادامه می‌دهند که به حالت درز با سطوح صاف و موازی نزدیک شوند. هرچند تغییر شیب ناگهانی دیواره‌ها باعث ایجاد تغییر ناگهانی علامت سرعت می‌شود.

با افزایش فشار اولیه تزریق، حداکثر سرعت در امتداد تزریق به صورت مستقیم و حداکثر سرعت در امتداد عمود بر تزریق به صورت غیر مستقیم افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲: نمودار تغییرات سرعت در امتداد عمود بر راستای تزریق به ازای نسبت تنگ شدگی ۰/۱۷

با کاهش نسبت K ، همانطور که در شکل ۱۲ آمده محدود تغییرات مؤلفه‌ی سرعت در جهت عمود بر راستای تزریق و دامنه موج ایجاد شده در انتهای مسیر افزایش می‌یابد و در مقابل با افزایش نسبت K عکس این حالت اتفاق افتاده و محدوده تغییرات سرعت و دامنه موج ایجاد شده کاهش می‌یابد این وضعیت در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار تغییرات سرعت در امتداد عمود بر راستای تزریق به ازای نسبت تنگ شدگی ۰/۳۴

۷- بحث و نتیجه گیری

هدف در این تحقیق بررسی تأثیر هندسه درز بر روی تغییرات سرعت دوغاب است. نکات قابل توجه در این مطالعه در نظر گرفتن شرایط جریان آشفته و ناپایا برای فرایند تزریق، اعمال تغییرات وابسته به زمان ویسکوزیته دوغاب و همچنین مطالعه سرعت در دو مؤلفه امتداد تزریق و عمود بر امتداد تزریق است. برای دستیابی به این هدف از اصول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش عددی حجم محدود استفاده شد و مدل‌هایی برای درزهایی با سطوح صاف و موازی و نیز درزه‌های

- Tunnelling and Underground Space Technology, 2000; Vol.15, No.4, pp 353.
- [6] Gustafson G. & Stille H., 1996; "*Prediction of groutability from grout properties and Hydrogeological data*", Tunnelling and underground space technology, vol. 11, No. 3, pp. 325-332.
- [7] Nonveiller E., 1989; "*Grouting Theory and Practice*", Elsevier, Vol 31- Issues 3-4.
- [8] Hakansson U., Hassler L. & Stille H., 1993; "*Rheological properties of cement based grouts Measuring techniques and factors of influence*", Proceedings of Conference on Grouting in Rock and Concrete, Balkema, Salzburg, pp.491-500.
- [9] Ewert F.K, 1985; "*Rock grouting with emphasis on dam sites*", springer, verlag, Berlin.
- [10] LittleJohn G.S., 1982; "*Design of cement based grouts*", Proceedings of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, Baker W.H. (editor), pp.35-48.
- منابع
- [1] Olsson R., Barton N., 2001; "*An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints*", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, pp317-329.
- [2] Widmann R. (Co-ordinator), 1996; "*Commission on Rock grouting*", International journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanical Abstracts, vol. 33, No. 8, 803-847.
- [3] Dalmalm, T. Lic Thesis, 2001; "*grouting prediction system for hard rock*". Based on active design. Division of soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- [4] Eriksson M, 2002, "*Predicton of grout spread and sealing effect*". Doctoral thesis, KTH, Byggetenskap.
- [5] Eriksson M., Stille H. and Andersson J., "*Numerical calculations for prediction of Grout Spread with Accounts for Filtration and Varying Aperture*".