

## تحلیل عدم قطعیت جریان تراوش از پی خاکی سد کوتاه بتنی

احمد شرافتی\*<sup>۱</sup> و سیدبهنام میرفخرائی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده عمران- معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(دریافت: ۹۶/۱۱/۵، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۶/۳۱)

### چکیده

ساختار پیچیده خاک، منجر به تغییرپذیری فضایی هدایت هیدرولیکی خاک در لایه‌های مختلف می‌شود. لذا فرض ثابت بودن ضریب نفوذپذیری در تحلیل تراوش از پی‌های خاکی با عدم قطعیت زیادی همراه است. در این تحقیق تحلیل تراوش از پی خاکی لایه‌ای در یک سد کوتاه با در نظر گرفتن عدم قطعیت ضریب نفوذپذیری انجام شده است. برای این منظور سعی شده است با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، عدم قطعیت و تغییر فضایی هدایت هیدرولیکی را در یک محیط دو لایه در زیر یک سد بتنی نفوذناپذیر کمی گردد. متغیرهای تصادفی بر اساس روش تجزیه چولسکی با در نظر گرفتن توزیع مشخص و همچنین توابع خودهمبستگی برای هر لایه تولید شده است. نتایج نشان داد که در ارزیابی تراوش در خاک‌های لایه‌ای، با در نظر گرفتن تغییرپذیری فضایی ضریب نفوذپذیری، دبی و گرادیان هیدرولیکی نوسانات زیادی را نشان می‌دهند، اما فشار برگش وارد بر سازه تا حدود زیادی مستقل از متغیرهای تصادفی بود. در واقع نتایج نشان داد که در ۶۰٪ کل تحلیل‌های احتمالاتی دبی خروجی بیشتر از تحلیل‌های قطعی است و حداکثر دبی خروجی احتمالاتی ۲ برابر دبی قطعی است. همچنین افزایش طول همبستگی قائم در لایه بالا تا ۱۲ متر، مقدار دبی احتمالاتی به دبی قطعی را برای لایه بالا تا ۱۰٪ افزایش و برای لایه پایین تا ۱۰٪ کاهش می‌دهد، ولی مقدار نسبت نیروی برگش ثابت می‌ماند. اما افزایش طول همبستگی قائم در لایه پایین تا ۱۲ متر، مقدار دبی احتمالاتی به دبی قطعی را برای هر دو لایه تا ۱۳٪ افزایش داد. در این مورد هم نسبت نیروی برگش احتمالاتی به قطعی همواره برابر عدد ۱ بود.

**کلیدواژه‌ها:** تراوش، پی خاکی، مونت کارلو، عدم قطعیت.

### ۱- مقدمه

محافظه کارانه برای خصوصیات یک لایه خاک در نظر گرفته می‌شود و هر لایه به صورت همگن فرض می‌شود (Gui و همکاران، ۲۰۰۰).

بنابراین در این حالت تخمین جریان تراوش آب از پی سدها همواره با عدم قطعیت همراه است. از طرفی طراحی‌های قطعی محافظه کارانه، ایمنی مورد نظر را در برابر خرابی‌های محتمل تضمین نمی‌کنند. تحلیل‌های احتمالاتی یک رویکرد منطقی برای بیان کمی عدم قطعیت در تحلیل و طراحی پدیده تراوش هستند که می‌توانند به خوبی اثرات تغییر در ضریب نفوذپذیری و هر پارامتر دیگری را منعکس کنند.

تا به امروز، مطالعات مختلفی در خصوص جریان تراوش در خاک با در نظر گرفتن نوسانات فضایی متغیرهای تصادفی با استفاده از تئوری میدان تصادفی انجام شده است. یکی از تلاش‌های ابتدایی برای اعمال اصول احتمالاتی به مسائل مهندسی ژئوتکنیک، بررسی اثر تغییرپذیری خاک بر جریان آب بود که

ناهمگنی و تغییرپذیری فضایی از خواص ذاتی خاک‌های طبیعی هستند (Lamb، ۱۹۶۶؛ Peck، ۱۹۶۷؛ Vanmarcke، ۱۹۷۷؛ DeGroot و Baecher، ۱۹۹۳).

خاک‌ها با توجه به شرایط محلی و زمین‌شناسی خاص منطقه-ای در لایه‌های مجزا شکل می‌گیرند. بافت محلی و ویژگی‌های مهم خاک در لایه‌های مختلف با استفاده از پروفیل‌های عرضی ارائه می‌شوند (Gui و همکاران، ۲۰۰۰).

درون‌یابی و مشخص کردن مرز بین این لایه‌ها با انجام فرآیندهای زمین‌شناسی انجام می‌شود (Christian و Baecher، ۲۰۰۳).

در یک توده خاک، ناهمگنی فضایی لایه‌های خاک ناشی از تغییرپذیری ذاتی ساختار خاک است. این تغییرپذیری ذاتی ناشی از فرآیندهای ژئومورفولوژی مانند، ته‌نشینی، هوازگی خاک طبیعی است. در روش‌های تحلیل قطعی تراوش، یک مقدار ثابت

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۷۷۲۹۲۸۹۶

طول همبستگی منجر به افزایش دبی خروجی شده و در مقادیر زیاد طول همبستگی نتایج حاصله با نتایج روش‌های تحلیلی یکسان می‌شود. در تمام مطالعات ذکر شده، فرض شده بود که خاک پی تک لایه است، در واقع مقدار میانگین برای کل لایه خاک ثابت فرض شده بود، به این معنی که میانگین خواص هیدرولیکی در دامنه ثابت بوده و کوواریانس بین دو نقطه در میدان تصادفی شبیه‌سازی شده به فاصله موقعیت آن دو نقطه از یکدیگر بستگی دارد. اما در واقعیت، خواص هیدرولیکی خاک، مقیاس‌های مختلفی از تغییرات فضایی را از خود نشان می‌دهند که ناشی از تنوع زمین-شناسی در مقیاس‌های بزرگ برای خاک‌ها (Lu و Zhang، ۲۰۰۷) است. بنابراین، محاسبه تراوش در این محیط‌ها نیازمند آن است که روش‌های تحلیل احتمالاتی برای شبیه‌سازی جریان تراوش در پروفیل‌های خاکی چند لایه‌ای تصادفی گسترش داده شوند. Tan و همکاران (۲۰۱۷) برای بررسی تأثیر تغییرپذیری فضایی پارامترهای هیدرولیکی روی تراوش در سدهای خاکی، تراوش اشباع-غیراشباع را با استفاده از شبیه‌سازی عددی در ترکیب با شبیه‌سازی مونت کارلو و تئوری میدان تصادفی به کار بردند و مدل Van Genechten را برای نشان دادن منحنی مشخصه خاک-آب استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که طول‌های همبستگی زیاد در راستای افقی منجر به میانگین و ضریب تغییرات بیشتر در نرخ جریان می‌شوند و همچنین نادیده گرفتن تغییرات فضایی پارامترهای هیدرولیکی منجر به بیش برآورد میانگین و ضریب تغییرات نرخ جریان در سدها می‌شود که می‌تواند منجر به طراحی محافظه‌کارانه سدها شود.

Hekmatzadeha و همکاران (۲۰۱۸) اعتبار پایداری یک سد را در برابر لغزش و پایپینگ با چهار نوع مختلف دیوار آب‌بند با مدل‌سازی تصادفی متغیرها بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد احتمال گسیختگی با در نظر گرفتن ضریب هدایت هیدرولیکی به صورت همسان برای هر چهار نوع دیوار یکسان است.

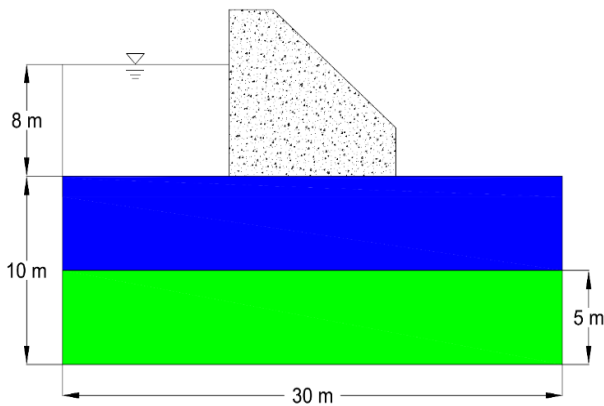
Johari و Heydari (۲۰۱۸) یک روش عملی را برای تحلیل اعتباری تراوش حالت پایدار با در نظر گرفتن تغییرپذیری فضایی نفوذپذیری ارائه دادند. نتایج آنها نشان داد که روش ارائه شده مطابقت مناسبی با سایر مطالعات موجود در ادبیات فنی دارد.

در این مطالعه اثر تغییرپذیری فضایی ضریب هدایت هیدرولیکی خاک اشباع بر روی تراوش آب از پی دو لایه‌ای یک سد کوچک بتنی (با نفوذپذیری صفر از بدنه سد) با استفاده از ترکیب روش تفاضل محدود و میدان‌های تصادفی بررسی شده است. میدان‌های تصادفی در هر دو لایه با استفاده از روش تجزیه چولسکی تولید شده و پس از آن تحلیل تراوش حالت پایدار با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D انجام گرفته است. در این مطالعه فقط به بررسی اثر نسبت ناهمسانی ضریب هدایت هیدرولیکی با فرض طول‌های همبستگی فضایی متفاوت در جهات افقی و

توسط Griffiths و Fenton (۱۹۹۳) مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین Griffiths و Fenton (۱۹۹۶) سطح آزاد جریان عبوری از بدنه یک سد خاکی با ناهمگونی تصادفی مصالح را بررسی کردند. آنها برای پارامتر نفوذپذیری خاک، توزیع احتمالاتی لگاریتم نرمال و ساختار همبستگی فضایی ایستا در نظر گرفتند. مطالعه آنها نشان داد که برای ناهمگونی همسان و سد مورد مطالعه، نتایج به نسبت مقیاس نوسان به طول حوزه جریان بستگی دارد. Griffiths و Fenton (۱۹۹۷) تراوش سه‌بعدی جریان آب در خاک‌های ناهمگن را مطالعه کردند، آنها روش میانگین‌گیری محلی تقسیم شده (Local Average Subdivision) را برای تولید داده‌های لگاریتم نرمال همسان تصادفی در روش شبیه‌سازی مونت کارلو به کار بردند. نتایج آنها نشان داد با افزایش ضریب تغییرات پارامتر نفوذپذیری خاک، سرعت میانگین جریان کاهش می‌یابد.

Gui و همکاران (۲۰۰۰)، تحلیل تراوش احتمالاتی را برای بررسی اثر تغییرپذیری فضایی ضریب هدایت هیدرولیکی بروی پایداری شیب سد خاکی با استفاده از ترکیب روش شبیه‌سازی میدان تصادفی انجام دادند. آنها ضریب هدایت هیدرولیکی را به صورت میدان متغیر ایستای فضایی در نظر گرفتند که دارای توزیع لگاریتم نرمال بود و از روش Turning Band برای تولید متغیر تصادفی ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کردند و پس از آن نتایج فشار آب حفره‌ای حاصل از تحلیل‌های تراوش را برای ارزیابی ضریب ایمنی شیب پایین دست سد خاکی مورد استفاده قرار دادند. آنها نشان دادند که افزایش انحراف معیار ضریب هدایت هیدرولیکی، میزان ضریب اعتباری سیستم را کاهش می‌دهد. Ahmed (۲۰۰۹)، جریان سطح آزاد آب را در سدهای خاکی با استفاده از روش‌های احتمالاتی مطالعه کرد. او برای ایجاد میدان تصادفی ضریب هدایت هیدرولیکی، روش میانگین‌گیری محلی تقسیم شده را انتخاب کرد و توزیع لگاریتم نرمال و ناهمگونی ناهمسانگردی (مقیاس نوسان در جهت افقی بزرگ‌تر از جهت عمودی) را برای این ضریب در نظر گرفت. نتایج آنها نشان داد که وقتی طول همبستگی در راستای افقی بسیار بیشتر از راستای عمودی است، جریان خروجی افزایش می‌یابد.

Srivastava و همکاران (۲۰۱۰)، اثر تغییرپذیری فضایی نفوذپذیری خاک را روی جریان آرام آب در یک شیروانی خاکی مورد مطالعه قرار دادند. نفوذپذیری خاک به صورت متغیر تصادفی با یک توزیع لگاریتم نرمال و ضریب تغییرات ۶۰ تا ۹۰٪ در نظر گرفته شد و طول همبستگی این پارامتر از ۰/۵ تا ۱۵ متر متغیر در نظر گرفته شد. آنها از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در ترکیب با روش عددی تفاضلات محدود برای تحلیل میدان‌های تصادفی تولیدی استفاده کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که دبی خروجی با افزایش ضریب تغییرات نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش



شکل ۱- هندسه مدل مورد مطالعه

برای بررسی تراوش در ناحیه مورد بررسی، شرایط مرزی در مدل سازی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که تمامی مرزهای جانبی و مرز زیرین در این مدل نفوذناپذیر هستند. بدنه سد بتنی نیز کاملاً نفوذناپذیر در نظر گرفته شده است. در نتیجه جریان آب تنها امکان ورود از بالادست و خروج از پایین دست سد را دارد. پی خاکی سد مورد مطالعه دارای ابعاد ۱۰ در ۳۰ متر می‌باشد. سطح آب در بالادست و پایین دست سد ثابت فرض می‌شود، ارتفاع آب در بالادست ۸ متر و در پایین دست صفر است. هر کدام از لایه‌های خاک نیز ضخامت ۵ متری دارند.

## ۲-۲- شبیه‌سازی مونت کارلو

تئوری‌های احتمالاتی در مهندسی ژئوتکنیک برای تعیین رفتار احتمالاتی سازه‌های ژئوتکنیکی یا برای ارزیابی قابلیت اطمینان آنها می‌باشند. در مسائل ژئوتکنیکی، زمین دارای رفتار کاملاً غیرخطی بوده و ویژگی‌های فیزیکی آن دارای تغییرپذیری هستند. در این موارد، شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از روش‌های احتمالاتی موجود است که برای تعیین حل دقیق مسائل ژئوتکنیکی ارائه شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو روشی برای تعیین توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی وابسته، با داشتن توزیع احتمالاتی مشخص برای هر یک از متغیرهای تصادفی مستقل است (Degroot, ۱۹۹۶). به منظور انجام شبیه‌سازی مونت کارلو، با در نظر گرفتن تغییرپذیری فضایی خاک، لازم است تا یک سری از متغیرهای تصادفی تولید شوند که توزیع احتمالاتی و ساختار همبستگی این متغیرها بر اساس داده‌های موجود تعیین یا فرض می‌شوند. پس از تولید این متغیرهای تصادفی، روی هر مجموعه از متغیرهای تولیدی تحلیل‌هایی انجام می‌گیرد و رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. این روش چندین بار تکرار می‌شود تا احتمال گسیختگی (یا هر کمیت مورد نظر) برای مسئله مورد نظر تعیین شود. شبیه‌سازی مونت کارلو اطلاعاتی در مورد احتمال گسیختگی، میانگین، انحراف معیار، تابع چگالی احتمالاتی و تابع احتمالاتی تجمعی را برای پاسخ سازه‌های

عمودی در دو لایه خاک پرداخته شده است و اثرات عدم قطعیت نفوذپذیری و تغییرپذیری فضایی آن روی جریان تراوش از پی، فشار برکنش موجود در زیر سازه و گرادیان جریان خروجی در سطح پایین دست مورد مطالعه قرار گرفته است و در نهایت نتایج تحلیل‌های آماری با نتایج روش‌های قطعی مقایسه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل تراوش

در طراحی سازه‌های هیدرولیکی، اثر جریان نفوذی و تراوش آب در پی باید مورد بررسی قرار گیرد. تأثیر تراوش آب روی پایداری زمین و در طی کنترل پدیده‌های پایپینگ و جوشش بررسی می‌شود، تحلیل تراوش به منظور جلوگیری از پایپینگ یا جوشش، یا برای انتخاب یک روش مناسب برای کاهش فشار منفذی آب و کاهش فشار مثبت وارده بر سازه‌ها انجام می‌گیرد. مقاومت ناشی از عبور آب از خلل و فرج موجود در خاک اساساً به دلیل اصطکاک ویسکوز عمل‌کننده در روی سطوح خاک است. اگر میزان تخلخل کم باشد و سرعت جریان نیز آرام باشد، در حالت کلی، جریان آرام اتفاق خواهد افتاد. خلل و فرج موجود در خاک در هم پیچیده و پیوسته هستند، اما وقتی که جریان عبوری آرام است، با در نظر گرفتن جهت میانگین حرکت جریان از دیدگاه ماکروسکوپی، خطوط جریان مشخصی شکل می‌گیرد که شبکه جریان نامیده می‌شوند. رابطه زیر بیانگر ارتباط بین سرعت میانگین جریان و گرادیان جریان است:

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

معادله (۱) به عنوان قانون داری شناخته می‌شود که  $k$  ضریب نفوذپذیری با واحد اندازه‌گیری  $m/s$  است. معادله دیفرانسیل حالت پایدار تراوش در یک خاک همگن نیز به شرح زیر است که در آن فرض شده که سیال تراکم‌ناپذیر بوده و با کاربرد معادله پیوستگی و قانون داری به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

که در آن  $h$  هد کل،  $k_x$  و  $k_y$  به ترتیب ضرایب نفوذپذیری در راستای  $x$  و  $y$  هستند. روش‌های عددی مانند روش المان محدود و روش تفاضل محدود در حل معادله (۲) استفاده می‌شوند، در این روش‌ها هیچ محدودیتی برای شکل هندسی مقطع، تغییرپذیری شرایط زمین و شرایط مرزی پیچیده وجود ندارد. در این مطالعه، تحلیل تراوش از پی یک سد بتنی با استفاده از روش تفاضل محدود انجام شده است. هندسه و شرایط مرزی برای جریان حالت پایدار از فونداسیون خاکی که شامل دو لایه زیر سد است، در شکل (۱) نشان داده شده است.

## ۱-۳-۲- تولید متغیرهای تصادفی همبسته (وابسته)

در این مطالعه، رفتار تصادفی ضریب نفوذپذیری خاک توسط توزیع لگاریتم نرمال کمی شده است. نفوذپذیری دارای میانگین  $\mu_k$  و انحراف معیار  $\sigma_k$  است که با ضریب تغییرات به صورت بی بعد تعریف شده‌اند و بیانگر آماره نقطه‌ای متغیر تصادفی می‌باشند.

$$CV = \frac{\sigma_k}{\mu_k} \quad (۴)$$

انتخاب توزیع لگاریتم نرمال بر این اساس است که ضریب نفوذپذیری کمیته مثبت است. آماره فضایی، طول همبستگی افقی و قائم است که برای تعریف تابع کوواریانس استفاده شده‌اند که نسبت آنها درجه ناهمگنی را نشان می‌دهد. روش ارائه شده در این بخش برای تولید میدان‌های تصادفی وابسته بکار می‌رود. پس از تعیین ویژگی‌های متغیر تصادفی، این متغیرهای همبسته (وابسته) بر پایه الگوریتم تجزیه ماتریس چولسکی تولید می‌شوند. ویژگی‌های این الگوریتم در زیر بیان شده است. متغیر تصادفی لگاریتم نرمال با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$k(x) = \exp(L \cdot \varepsilon_{\ln k(x)} + \mu_{\ln k(x)}) \quad (۵)$$

$x$  موقعیت فضایی متغیر تصادفی،  $\mu_{\ln k(x)}$  میانگین نفوذپذیری در موقعیت فضایی  $x$  و  $\varepsilon_{\ln k(x)}$  یک متغیر تصادفی نرمال استاندارد غیرهمبسته است.  $L$  یک ماتریس پایین مثلثی است که از تجزیه ماتریس کوواریانس با روش تجزیه چولسکی از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\sigma_{\ln k}^2 = \ln(1 + cov_k^2) \quad (۶)$$

$$\mu_{\ln k} = \ln(k) - 0.5\sigma_{\ln k}^2 \quad (۷)$$

$$CM_k = LL^T \quad (۸)$$

$CM_k$  ماتریس کوواریانس است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CM_k = \sigma_{\ln k}^2 \rho(x, y) \quad (۹)$$

$\rho(x, y)$  تابع خودهمبستگی فضایی است که در این تحقیق با تابع همبستگی نمایی-کاهشی، گوس-مارکوف در ماتریس کوواریانس نشان داده شده است. شکل ناهمسان این تابع با معادله (۳) نشان داده می‌شود. برای تولید متغیر تصادفی، ابتدا ماتریس کوواریانس را با در نظر گرفتن معادله (۳) تولید می‌کنیم، مقادیر  $x$  و  $y$  فاصله مرکز به مرکز المان‌ها در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۲) نمونه‌ای از مش‌بندی تفاضل محدود را همراه با مراکز المان‌ها و فواصل آنها نشان می‌دهد که برای محاسبه فاصله مرکز به مرکز المان‌ها، فاصله افقی و عمودی آنها را بصورت مجزا محاسبه می‌کنیم تا بتوان متغیری ناهمسان تولید کرد. اندازه مش تفاضل محدود به گونه‌ای انتخاب شده است که مشخصات اساسی ساختار همبستگی نمایش

ژئوتکنیکی ارائه می‌دهد. یکی از مهم‌ترین عوامل در دقت نتایج حاصله در روش مونت کارلو، تعداد شبیه‌سازی‌های لازم است که بر اساس میانگین متحرک نتایج حاصله از تحلیل‌ها و برای سطح مشخصی از خطای مورد قبول انتخاب می‌شود.

## ۳-۲- متغیرهای تصادفی

زمین از ساختارهای طبقه‌بندی شده مختلف با ضرایب نفوذپذیری کاملاً مجزا تشکیل می‌شود و ضریب نفوذپذیری حتی در یک لایه مشخص دارای تغییرپذیری است. همچنین دو لایه خاک با میانگین ضرایب نفوذپذیری یکسان، ممکن است تغییرات فضایی مختلفی داشته باشند که ناشی از تفاوت در ساختار همبستگی آنها است (Chok, ۲۰۰۹). بنابراین، به منظور تعیین کمی عدم قطعیت در جریان تراوش در زمین‌های متشکل از چند لایه خاک، لازم است که از متغیرهای تصادفی غیرایستا استفاده کنیم. تغییرپذیری فضایی زمین را نمی‌توان توسط مقادیر عددی واحد، مانند میانگین یا واریانس کمی کرد. تغییرپذیری فضایی ویژگی‌های خاک را می‌توان با ساختارهای همبستگی در چارچوب تئوریک مدل‌های مختلف متغیرهای تصادفی (Vanmarcke, ۱۹۸۳) توصیف کرد. برای بیان همبستگی خاک، از مفهوم فاصله همبستگی استفاده می‌شود که بیانگر محدوده فضایی است که همبستگی قوی بین ویژگی‌های خاک وجود دارد (Degroot و Baecher, ۱۹۹۳).

مقادیر زیاد فاصله همبستگی به این مفهوم است که خواص فیزیکی زمین همبستگی قوی را در یک محدوده گسترده فضایی نشان می‌دهند و بیانگر تغییرات تدریجی در لایه‌های زمین است. در مقابل، فاصله همبستگی کوچک بدین معنی است که دامنه نوسانات زمین بزرگ است. مفهوم همبستگی همسان به طور گسترده‌ای در مطالعات متغیرهای تصادفی خاک استفاده شده است، اما به دلیل روند شکل‌گیری زمین، به طور طبیعی مقیاس نوسان در جهت عمودی بسیار کوچک‌تر از جهت افقی است (Degroot و Baecher, ۱۹۹۳).

متغیر تصادفی نرمال را می‌توان با میانگین  $\mu(x)$ ، واریانس،  $\sigma^2$  و تابع خودهمبستگی،  $\rho(x, x')$  تعریف کرد. توابع همبستگی‌ای که به طور گسترده در مهندسی ژئوتکنیک استفاده می‌شوند توسط Li و Lumb (۱۹۸۷) و Rackwitz (۲۰۰۰) معرفی شده‌اند. در این مطالعه تابع همبستگی نمایی با ساختار ناهمسان در دو راستای عمودی و افقی استفاده شده است.

$$\rho(x, y) = \exp\left(\frac{-|x-x'|}{L_h} - \frac{|y-y'|}{L_v}\right) \quad (۳)$$

$L_h$  و  $L_v$  به ترتیب مقیاس نوسان در راستای افقی و قائم هستند و مقادیر قدرمطلق‌ها بیانگر فواصل افقی و عمودی نقاط می‌باشند.

خروجی به سد و فشار بالا برنده وارد بر کف سازه محاسبه شده و در شکل (۱) نشان داده شده است. در تحلیل قطعی تراوش، نفوذپذیری خاک به صورت همگن (میانگین یکسان برای هر دو لایه) و برابر  $2 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل قطعی نشان داد که مقدار دبی خروجی ( $Q_{det}$ ) برابر با  $4.19 \times 10^{-5} m^3/s/m$  و گرادیان هیدرولیکی در نزدیکی سطح زمین (بلافاصله بعد از سازه) برابر با  $0.114$  است. همچنین مقدار نیروی برکنش وارد بر سازه ( $F_{det}$ ) که با انگرال گیری از فشار هیدرولیکی وارد بر زیر سازه به دست می آید، برابر با  $5.01$  کیلونیوتن برآورد شد. در شکل (۳-الف)، توزیع هد کل و مسیر جریان و در شکل (۳-ب) توزیع بردارهای جریان نشان داده شده است. در لایه بالایی، جریان های رو به پایین و رو به بالا در ورودی و خروجی جریان رخ می دهد و در زیر سازه جریان افقی غالب است. در لایه پایین، جریان افقی غالب است. تجمع بردارهای سرعت در نزدیکی لبه ابتدایی و انتهایی سازه بیانگر گرادیان هیدرولیکی زیاد در این نقاط است.

### ۳-۲- تحلیل احتمالاتی تراوش

ضریب نفوذپذیری یکی از ویژگی های خاک است که دارای یکی از بیشترین ضریب تغییرات می باشد. محققین مختلف مقادیر مختلفی را برای ضریب تغییرات نفوذپذیری پیشنهاد داده اند، Srivastava (۲۰۰۰) بازه ای بین  $60\%$  تا  $90\%$ ، Lumb (۱۹۶۶) بازه ای بین  $20\%$  تا  $30\%$ ، Benson (۱۹۹۳) بازه ای بین  $50\%$  تا  $200\%$  و Baecher و Christian (۲۰۰۳) تا  $500\%$  را پیشنهاد دادند. البته مطالعات انجام شده نشان داده است که میزان ضریب تغییرات برای خاک های اشباع بسیار کم تر از خاک های غیر اشباع است. با توجه به فرض حالت پایدار تراوش در این مطالعه مقدار ضریب تغییرات برابر  $60\%$  انتخاب شده است. همچنین فرض شده است که ضریب نفوذپذیری تصادفی از توزیع لگاریتم نرمال تبعیت می کند (Fenton و Griffiths، ۱۹۹۸).

بر اساس مطالعات El Ramly و همکاران (۲۰۰۳) فاصله خود-همبستگی برای ضریب نفوذپذیری در جهت افقی در بازه  $10$  تا  $40$  متر و برای جهت عمودی حدود  $1$  تا  $3$  متر است. خصوصیات احتمالاتی ضریب نفوذپذیری لایه های پی مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است.

به منظور مقایسه نتایج تحقیق، حالتی که  $C.V=60\%$ ،  $L_h=20$  و  $L_v=2$  متر است، به عنوان مدل پایه انتخاب شد و سایر مدل ها با طول های همبستگی مختلف نسبت به این حالت مقایسه شدند. شبیه سازی توزیع فضایی ضریب نفوذپذیری در دو لایه پی به صورت مستقل با میانگین و ضریب تغییرات یکسان انجام شد و سپس با توجه به مدل قطعی و اعمال شرایط مرزی و میدانی یکسان به مدل احتمالاتی، تحلیل تراوش با استفاده از نرم افزار FLAC 2D انجام گرفت.

داده شود. با انجام تحلیل های قطعی با اندازه المان های مختلف بروی مدل مورد نظر، و با در نظر داشتن حجم محاسبات مورد نظر برای تحلیل های احتمالاتی، المان هایی با ابعاد  $0.25$  در  $0.25$  متر برای این مطالعه انتخاب شده است. ماتریس کوواریانس، ماتریس مربعی  $n \times n$  است که  $n$  برابر با تعداد المان ها است. پس از تولید و تجزیه ماتریس کوواریانس به دو ماتریس پایین مثلثی و بالا مثلثی با تکنیک تجزیه چولسکی، با کاربرد معادله (۵) متغیر تصادفی  $k$  را تولید می کنیم. کل فرآیند محاسباتی ذکر شده به همراه خودکار سازی تولید متغیرها با ایجاد یک برنامه عددی در زیر برنامه FISH در کد FLAC انجام گرفته است.

### ۳- نتایج و بحث

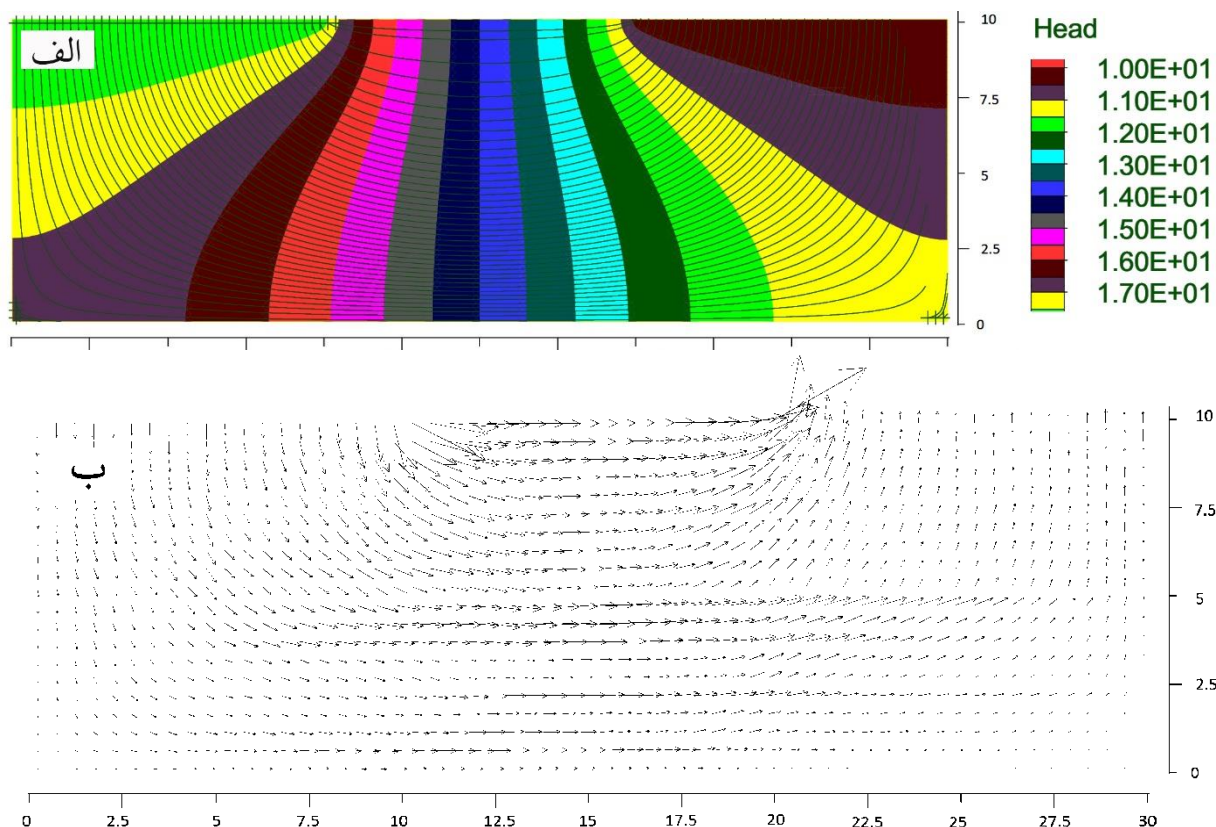
از آنجا که ضریب نفوذپذیری برای محاسبه تمام متغیرهای مربوط به رفتار نفوذپذیری خاک استفاده می شود، با دانستن عدم قطعیت همراه با تغییرپذیری فضایی ضریب نفوذپذیری، با تحلیل های تراوش می توان چگونگی تأثیر عدم قطعیت ضریب نفوذپذیری در تولید فشارهای آب حفره ای و دبی خروجی را نشان داد. تحلیل های تراوش با در نظر گرفتن عدم قطعیت نشان می دهد که عدم قطعیت در ضریب نفوذپذیری چگونه باعث تغییرات فشار آب حفره ای و میزان تراوش می شود و همچنین می تواند میانگین، انحراف معیار، تابع احتمال میزان تراوش، اضافه فشار آب حفره ای و نیروی برکنش را محاسبه کند. در این مطالعه، تراوش از زیر یک سازه هیدرولیکی روی پی دو لایه با در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری به عنوان یک متغیر تصادفی بررسی شده است. در این تحلیل ها میانگین و انحراف معیار ضرایب نفوذپذیری دو لایه فوقانی و تحتانی مقدار ثابتی دارند و فقط اثر فواصل همبستگی مختلف در دو لایه روی رفتار تراوش بررسی شده است.

●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●

شکل ۲- مش بندی تفاضل محدود پی سد همراه با مراکز المان ها

### ۳-۱- تحلیل های قطعی تراوش

بر اساس تحلیل قطعی انجام شده توسط نرم افزار FLAC 2D میزان تراوش از پی، گرادیان هیدرولیکی در نزدیک ترین نقطه

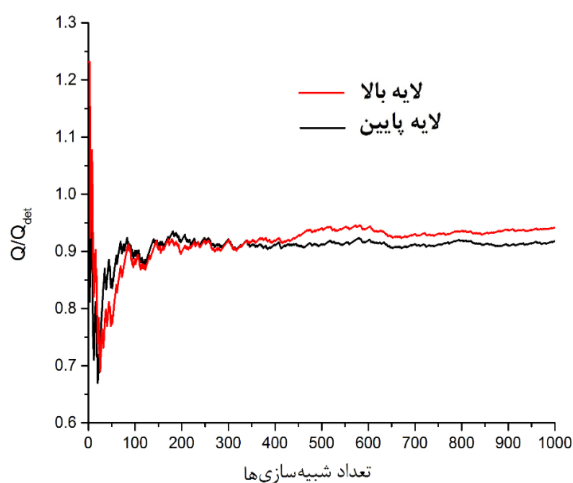


شکل ۳- نتایج تحلیل قطعی تراوش از پی دو لایه: الف) توزیع هد کلی جریان و مسیر جریان، ب) توزیع بردارهای جریان

به ساختار لایه‌ای در آن شده است. اما برای لایه پایینی هر دو مقدار طول همبستگی افقی و قائم کم هستند که ساختار منظمی مشاهده نمی‌شود، هر چند به دلیل طول همبستگی بیشتر در راستای افق، پیوستگی افقی بیشتری در آن دیده می‌شود.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری پارامتر ضریب نفوذپذیری

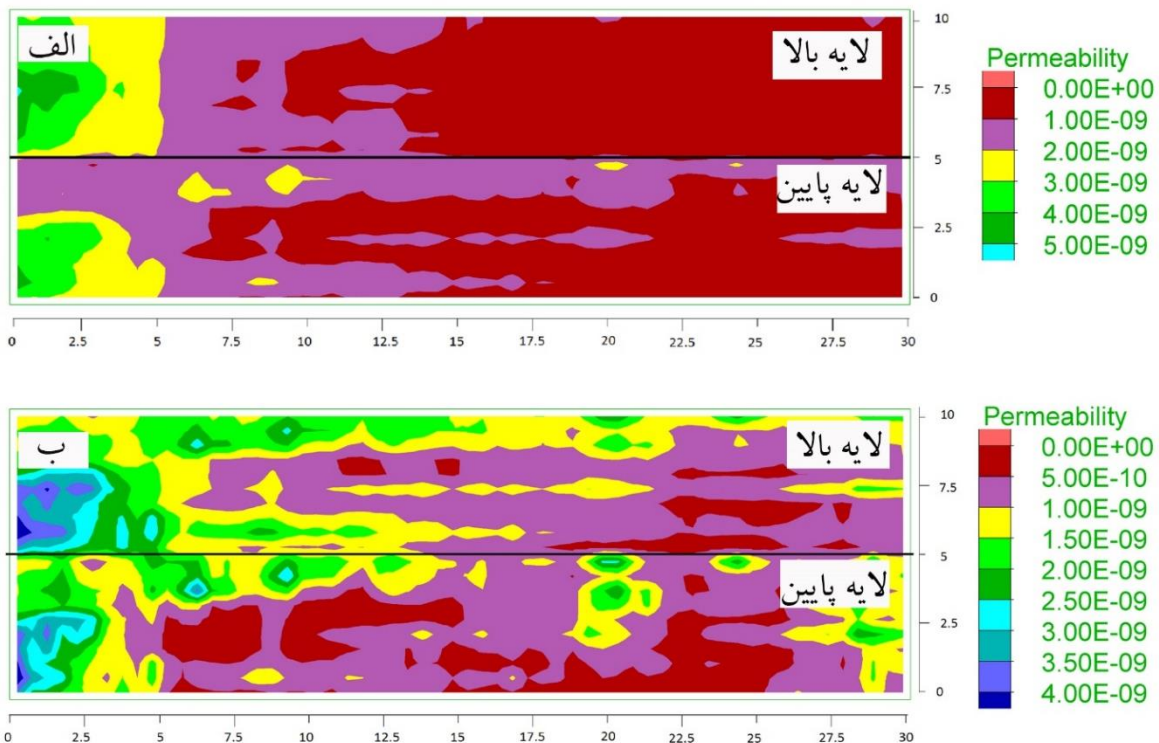
پارامتر	میانگین (m/s)	ضریب تغییرات (%)	فاصله خود همبستگی (m)
$k$	$2 \times 10^{-5}$	۶۰	$L_h = 40, 20, 10, 5$ $L_v = 12, 8, 4, 2, 1$



شکل ۴- تعداد شبیه‌سازی‌ها در برابر میانگین متحرک دبی خروجی ( $L_v=12$  و  $L_h=20$ ,  $C.V=60\%$ )

به منظور شبیه‌سازی مونت کارلو، برای هر حالت ابتدا ۱۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شد. به منظور اطمینان از کفایت تعداد شبیه‌سازی‌ها، نتایج مقادیر میانگین دبی خروجی در برابر تعداد شبیه‌سازی‌ها رسم گردید. با انتخاب خطای ۱٪ برای تغییرات میانگین متحرک دبی خروجی، مشاهده شد که تعداد ۵۰۰ شبیه‌سازی شرط لازم خطای مورد نظر را ارضا می‌کند. در نتیجه، برای هر مجموعه تعداد ۵۰۰ شبیه‌سازی با خواص آماری مربوط به آن مجموعه انجام شد. شکل (۴) نمونه‌ای از این تغییرات را برای  $L_v=12$  و  $L_h=20$ ,  $C.V=60\%$  نشان می‌دهد. دو نمونه از میدان‌های شبیه‌سازی شده با طول‌های همبستگی مختلف در شکل (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده است.

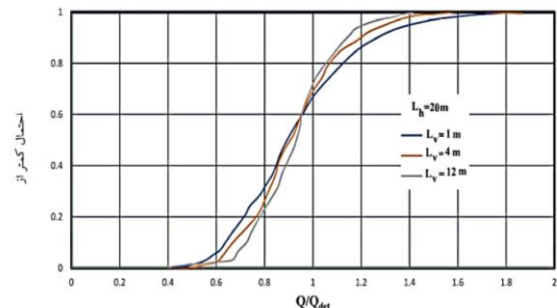
همان‌گونه که در شکل (۵-الف) نشان داده شده است، افزایش  $L_v$  در لایه بالایی منجر به شکل‌گیری محیطی با یکنواختی بیشتر شده است، اما لایه پایینی چند لایه به نظر می‌رسد. همچنین در شکل (۵-ب)، لایه بالایی دارای  $L_h$  زیاد و  $L_v$  کم هست که منجر



شکل ۵- میدان‌های تصادفی ضریب نفوذپذیری: (الف) لایه بالا،  $L_h=20$  و  $L_v=12$ ، لایه پایین  $L_h=20$  و  $L_v=2$ ، (ب) لایه بالا،  $L_h=20$  و  $L_v=2$ ، لایه پایین  $L_h=4$  و  $L_v=2$

### ۳-۳- توزیع فضایی میانگین و انحراف معیار دبی خروجی

با استفاده از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو، توزیع احتمالاتی متغیرهای مربوط به تراوش استخراج شده است. نمونه‌ای از توزیع تجمعی احتمالاتی تراوش در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج این شکل نشان داد که در ۶۰٪ مدل‌های احتمالاتی، دبی خروجی تحلیل‌های احتمالاتی بیشتر از دبی خروجی حاصل از تحلیل‌های قطعی است همچنین حداکثر مقدار دبی احتمالاتی در حدود ۲ برابر و حداقل مقدار آن در حدود ۰/۴ برابر دبی قطعی است.



شکل ۶- اثر طول خودهمبستگی قائم در لایه بالایی روی توزیع

تجمعی میزان دبی خروجی (مشخصات لایه پایین،

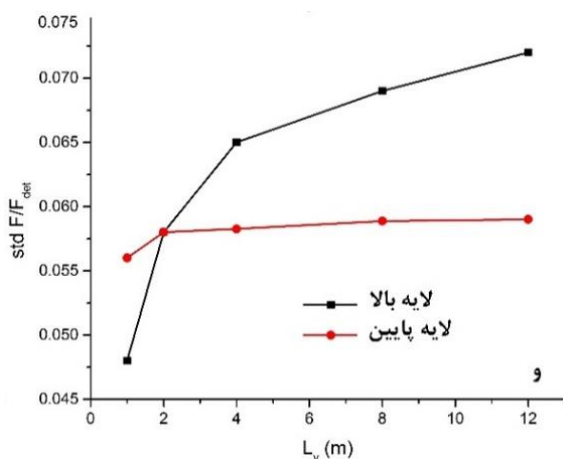
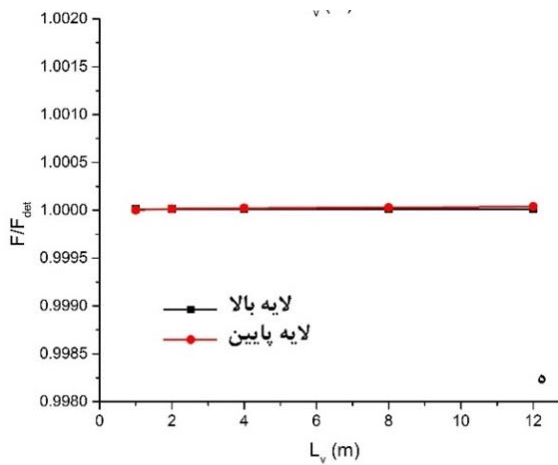
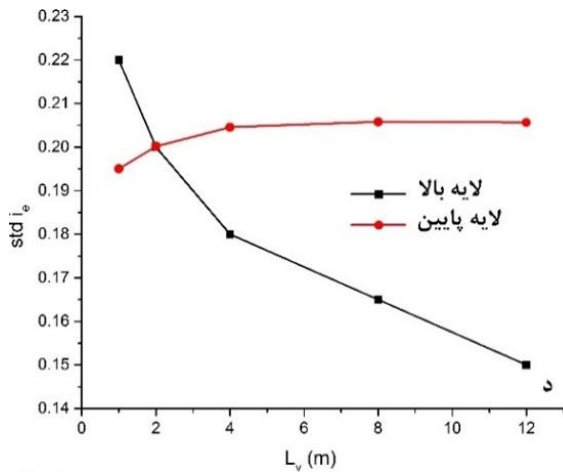
$$(L_h = 20, L_v = 2, C.V = 60\%)$$

### ۴-۳- تأثیر فاصله خودهمبستگی عمودی $L_v$ در هر لایه

در این بخش تأثیر فاصله خودهمبستگی عمودی روی رفتار تراوش بررسی شده است. برای ساده‌سازی این مسئله فرض شده است که میانگین ضریب نفوذپذیری و ضریب تغییرات  $(C.V=60\%)$  در لایه‌های بالا و پایین یکسان هستند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷-الف) مشخص شد که میانگین نرخ جریان (در هر ساعت) محاسبه شده از پی کم‌تر از مقدار حاصل از تحلیل قطعی است و همچنین میانگین نرخ جریان با افزایش  $L_v$  در لایه بالایی، افزایش خطی از خود نشان می‌دهد.

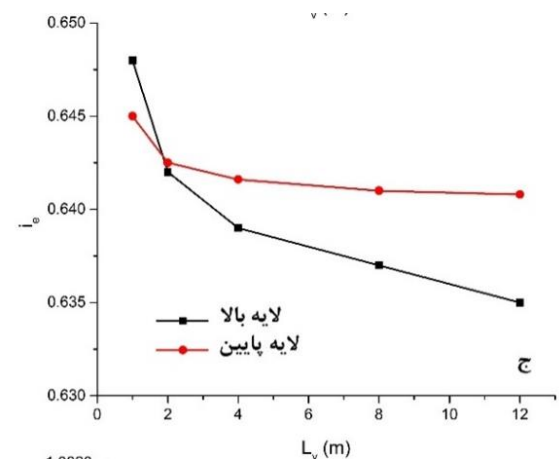
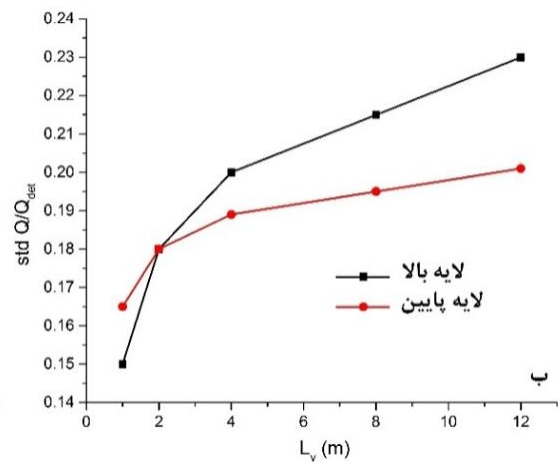
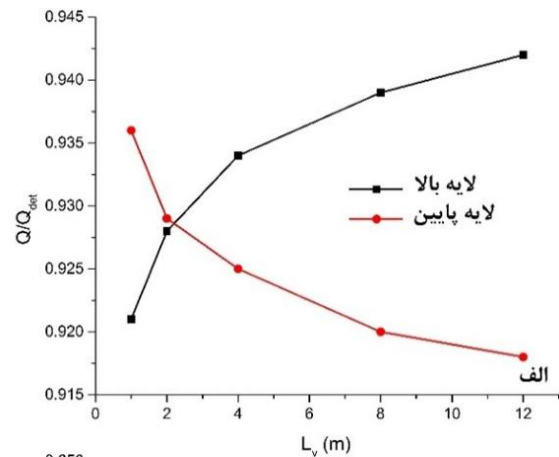
این پدیده ناشی از تشکیل جریان عمودی (مسیرهای جریان عمودی) قابل توجهی در لایه‌های بالا و پایین است. فاصله خودهمبستگی بزرگ‌تر در جهت عمودی بدین معنی است که ضریب نفوذپذیری زمین در جهت عمودی می‌تواند به طور پیوسته توزیع شود و مسیر جریان بسمت عمق گسترش یافته و مقدار تراوش افزایش می‌یابد. با این حال، در لایه پایین، جریان افقی غالب است و با افزایش  $L_v$ ، مناطق با ضریب نفوذپذیری پیوسته با مقدار کم، شکل می‌گیرد که منجر به کاهش خطی میزان تراوش می‌شود. انحراف معیار نسبت دبی تراوش احتمالاتی به دبی تراوش قطعی در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. نتایج بیانگر افزایش

انحراف معیار با افزایش مقدار  $L_v$  می‌باشند. این شکل همچنین نشان می‌دهد که تغییر  $L_v$  در لایه بالایی تأثیر بیشتری بر روی تغییرات حجم آب تراوش شده دارد، زیرا جریان آب از طریق لایه بالایی بزرگ‌تر از جریان از لایه پایینی است. تغییرات مقدار میانگین گرادیان خروجی در شکل (۷-ج) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین گرادیان هیدرولیکی استخراج شده از تحلیل احتمالاتی کم‌تر از مقدار حاصله از تحلیل قطعی است.



شکل ۷- تغییرات دبی، گرادیان هیدرولیکی و نیروی برکنش با اثر فاصله خودهمبستگی قائم هر لایه

همچنین با افزایش فاصله خودهمبستگی در جهت عمودی، گرادیان هیدرولیکی کم‌تر می‌شود و اثر تغییرات  $L_v$  بر گرادیان هیدرولیکی در لایه بالایی بیشتر از لایه پایینی است. تغییرات انحراف معیار گرادیان هیدرولیکی نسبت به تغییرات  $L_v$  در شکل

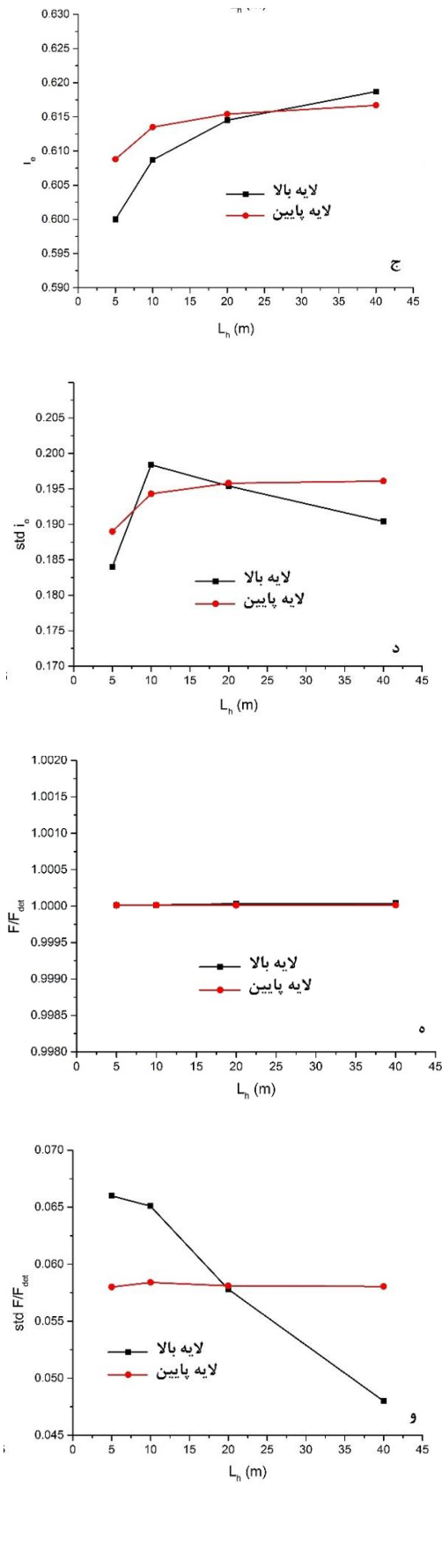




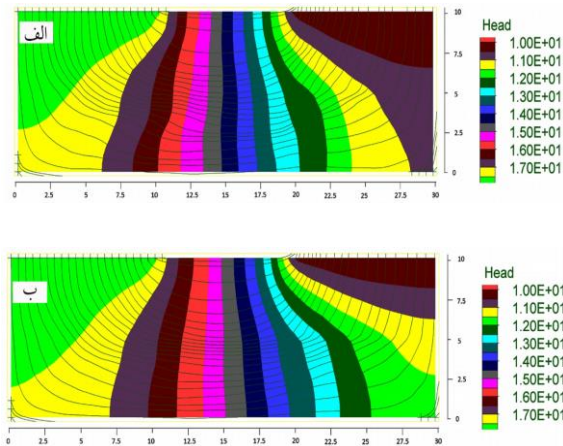
(۷-د) نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش  $L_v$  در لایه بالایی، انحراف معیار گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در واقع، زمانی که فاصله خودهمبستگی عمودی خاک در اطراف سازه افزایش می‌یابد (یعنی ضریب نفوذپذیری پیوسته‌تر در جهت عمودی)، به دلیل کاهش میانگین گرادیان هیدرولیکی خروجی، انحراف معیار نیز کاهش می‌یابد و احتمال ناپایداری خاک در بخش خروجی کاهش می‌یابد. همچنین فاصله خودهمبستگی عمودی لایه پایینی اثر زیادی روی گرادیان هیدرولیکی خروجی ندارد، زیرا گرادیان هیدرولیکی خروجی عمدتاً تحت تأثیر لایه بالایی در اطراف سازه قرار دارد که جریان از آن خروج می‌کند. اثر تغییر در  $L_v$  بر میانگین و انحراف معیار فشار برکنش وارد بر سازه نیز به ترتیب در شکل‌های شکل (۷-ه) و شکل (۷-و) ارائه شده است. نتایج نشان داد که تغییرات میانگین فشار، متأثر از تغییرات  $L_v$  نیست. اما انحراف معیار آن با تغییرات  $L_v$  افزایش می‌یابد.

### ۳-۵- تأثیر فاصله خودهمبستگی افقی $L_h$ در هر لایه

در این بخش اثر تغییرات فاصله همبستگی افقی روی رفتار تراوش در هر لایه بررسی شده است. نتایج ارائه شده در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) نشان می‌دهد که میانگین و انحراف معیار نرخ جریان تراوش در هر ساعت با افزایش فاصله همبستگی افقی در لایه‌های بالا و پایین افزایش می‌یابد. افزایش  $L_h$  به معنی همبستگی بالای ضریب نفوذپذیری در جهت افقی است.



طریق بخش‌هایی در میدان توزیع فضایی ضریب نفوذپذیری است که متفاوت از الگوی شبکه جریان در حالت قطعی است.



شکل ۸- نمونه‌ای از شبکه جریان تصادفی تولید شده:

الف) توزیع هد کل، مسیر جریان (لایه بالایی،  $L_h=20$  و  $L_v=2$ ، لایه پایینی  $L_h=4$  و  $L_v=2$ )، توزیع هد کل، مسیر جریان (لایه بالایی،  $L_h=20$  و  $L_v=10$ ، لایه پایینی  $L_h=20$  و  $L_v=2$ )

بنابر این میزان دبی خروجی آنها نیز متفاوت خواهد بود. میزان دبی خروجی در این حالت برابر با  $4.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$  بود. شکل (۹- ب) نیز مربوط به حالتی است که فاصله خودهمبستگی افقی لایه بالایی بزرگتر از لایه پایینی است، این توزیع منجر به تشکیل مسیرهای عبور جریان در لایه بالایی می‌شود که باعث می‌شود بخش زیادی از جریان از لایه بالایی عبور کند. میزان دبی خروجی در این حالت برابر با  $3.62 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$  بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی اثر تغییرپذیری فضایی ضریب نفوذپذیری روی رفتار تراوش در یک پی دو لایه پرداخته شده است و تحلیل‌های تراوش احتمالاتی روی این دو لایه اشباع در حالت پایدار انجام گرفته است. برای تحلیل تراوش، روش تفاضل محدود مورد استفاده قرار گرفته و ناهمسانی مربوط به همبستگی فضایی در راستاهای افقی و عمودی ضریب نفوذپذیری در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر ناهمگنی فضایی روی تراوش از درون خاک دو لایه زیر سازه هیدرولیکی، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ترکیب با میدان‌های تصادفی استفاده شد. روش تجزیه چولسکی برای تولید میدان تصادفی با در نظر گرفتن توابع توزیع احتمالاتی ورودی و تابع خودهمبستگی اختصاص یافته به هر یک از لایه‌ها، استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داد که الگوهای مختلف تراوش در خاک‌ها به علت تغییرپذیری فضایی ضریب نفوذپذیری در زمین‌های لایه‌ای را می‌توان با استفاده از روش تحلیل تصادفی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که در

#### شکل ۸- تغییرات دبی، گرادیان هیدرولیکی و نیروی برکنش با اثر فاصله خودهمبستگی افقی هر لایه

این منجر می‌شود که احتمال تشکیل لایه‌های نفوذپذیر پیوسته در راستای افقی افزایش یابد و در نتیجه مسیریابی برای جریان آب بوجود می‌آید و نرخ تراوش با افزایش  $L_h$  افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول افقی همبستگی، میزان دبی خروجی به سمت میزان قطعی آن پیش می‌رود که به دلیل همگن شدن محیط مورد مطالعه است. نکته مهم دیگر این است که به دلیل غالب بودن جریان افقی در لایه زیرین، تشکیل مسیرهای افقی عبور جریان در این لایه برای مقادیر  $L_h$  کم منجر به افزایش سریع جریان تراوش می‌شود، ولی با افزایش بیشتر  $L_h$ ، نرخ افزایش جریان تراوش کم می‌شود. اما برای لایه بالایی با جریان غالب قائم، تشکیل مسیرهای افقی عبور جریان در این لایه برای  $L_h$ های کم تأثیر چندانی روی دبی خروجی ندارد، چون جریان عمود هنوز غالب است، ولی با افزایش  $L_h$ ، جریان افقی در این لایه غالب شده و دبی افزایش می‌یابد. افزایش انحراف معیار دبی با افزایش  $L_h$  هم به دلیل تنوع شکل‌گیری مسیرهای مختلف عبور جریان در لایه‌ها است. نتایج ارائه شده در شکل (۸- ج) نشان می‌دهد که با افزایش  $L_h$  گرادیان هیدرولیکی خروجی افزایش می‌یابد و برای تمامی مقادیر  $L_h$ ، گرادیان هیدرولیکی خروجی بیشتر از مقدار قطعی است. همچنین شکل (۸- د) تغییر در انحراف معیار گرادیان هیدرولیکی خروجی را نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش  $L_h$  در لایه بالایی، افزایش انحراف معیار تا یک مقدار مشخص (۰/۱۹۸) ادامه یافته و سپس کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با افزایش  $L_h$  تا طول سازه سد، تشکیل مسیرهای متعدد عبور جریان منجر به افزایش پراکندگی نتایج می‌شود، اما با افزایش بیشتر  $L_h$ ، طول مسیرهای جریان از طول سازه بیشتر شده و تأثیر محل قرارگیری این مسیرها روی جریان خروجی کم می‌شود. همچنین افزایش  $L_h$  در لایه پایینی، تأثیر زیادی روی نتایج خروجی ندارد. تغییرات میانگین و انحراف معیار فشار برکنش در شکل‌های (۸- ه) و (۸- و) ارائه شده است. نتایج بیانگر عدم تأثیر  $L_h$  روی میزان نیروی برکنش است. اما میزان انحراف معیار نیروی برکنش با افزایش  $L_h$  در لایه بالایی به صورت خطی کاهش می‌یابد و مقدار تغییرات انحراف معیار نیروی برکنش در لایه پایینی بسیار کم است.

#### ۳-۶- مشخصات جریان در میدان‌های تصادفی تولیدی

در شکل (۹) دو نمونه از شبکه جریان تصادفی تولیدی و نتایج تحلیل مربوط به آنها ارائه شده است. در شکل (۹- الف) شبکه جریان مرتبط با حالتی که در آن فاصله خودهمبستگی قائم در لایه بالایی بزرگتر از لایه پایینی است، نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهد که به طور مشخص مسیر تراوش اصلی از

- Chock YH, "Modeling the effects of soil variability and vegetation on the stability of natural slopes", Ph.D. thesis, The University of Adelaide, Australia, 2009
- DeGroot DJ, "Analyzing spatial variability of insitu soil properties", Uncertainty in the geologic environment, from theory to practice, Proceedings of Uncertainty, Geotechnical special publication No. 58, Madison, Wisconsin, 1996, 210-238.
- DeGroot DJ, Baecher GB, "Estimating autocovariance of in-situ soil properties", Geotechnical and Geoenvironmental, 1993, 119 (1), 147-166.
- El-Ramly H, Morgenstern NR, Cruden DM, "Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay-shale", Canadian Geotechnical, 2003, 40, 192-208.
- Fenton GA, Griffiths DV, "Statistics of free surface flow through stochastic earth dam", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996, 122 (6), 427-436
- Fenton, GA, Griffiths DV, "Statistics of block conductivity through a simple bounded stochastic medium", Water Resources Research, 1993, 29 (6), 1825-1830.
- Griffiths DV, Fenton GA, "Probabilistic analysis of exit gradients due to steady seepage", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124, 789-797.
- Gui S, Zhang R, Turner JP, Xue X, "Probabilistic slope stability analysis with stochastic hydraulic conductivity", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126 (1), 1-9.
- Hekmatzadeh AA, Zarei F, Johari A, Haghghi A, "Reliability analysis of stability against piping and sliding in diversion dams, considering four cutoff wall configurations", Computers and Geotechnics, 2018, 98, 217-231.
- Johari A, Heydari A, "Reliability analysis of seepage using an applicable procedure based on stochastic scaled boundary finite element method", Engineering Analysis with Boundary Elements, 2018, 94, 44-59.
- Lamb P, "The variability of natural soils", Canadian Geotechnical, 1966, 3, 74-97.
- Lu Z, Zhang D, "Stochastic simulations for flow in nonstationary randomly heterogeneous porous media using a KLbased moment-equation approach", SIAM, 2007, 6, 228-245.
- Peck RB, "Stability of natural slopes", Soil Mechanics and Foundation, 1967, 93 (4), 403-417.
- Srivastava A, Sivakumar GL, Haldar S, "Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis", Engineering Geology, 2010, 110 (3-4), 93-101.
- Vanmarcke EH, "Probability modeling of soil profiles", Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11), 1227-1246.
- Vanmarcke EH, "Random Fields: Analysis and Synthesis", The MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- Xaohui T, Wang X, Khoshnevisan S, Hou X, Zha F, "Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters", Engineering Geology, 2017, 228, 260-269.
- ۶۰٪ کل تحلیل‌های احتمالاتی دبی خروجی بیشتر از تحلیل‌های قطعی است و حداکثر دبی خروجی احتمالاتی ۲ برابر دبی قطعی است. همچنین افزایش طول همبستگی قائم در لایه بالا تا ۱۲ متر، مقدار دبی احتمالاتی به دبی قطعی را برای لایه بالا تا ۱۰٪ افزایش و برای لایه پایین تا ۱۰٪ کاهش می‌دهد، ولی مقدار نسبت نیروی برکنش ثابت می‌ماند. اما افزایش طول همبستگی قائم در لایه پایین تا ۱۲ متر، مقدار دبی احتمالاتی به دبی قطعی را برای هر دو لایه تا ۱۳٪ افزایش داد. در این مورد هم نسبت نیروی برکنش احتمالاتی به قطعی همواره برابر عدد ۱ بود. نتایج کلی از مطالعه نشان داد که با در نظر گرفتن تغییرپذیری فضایی ضریب نفوذپذیری، نرخ دبی و گرادیان هیدرولیکی نوسانات زیادی را نشان دادند. اما فشار برکنش وارد بر سازه تا حدود زیادی مستقل از متغیرهای تصادفی بود. میانگین نرخ جریان محاسبه شده از پی کم‌تر از مقدار حاصل از تحلیل قطعی است و با افزایش  $L_v$  در لایه بالایی، نرخ جریان افزایش خطی دارد. نوع تغییرات نرخ جریان محاسبه شده، تابع جریان غالب در لایه‌ها است. با افزایش مقدار  $L_v$  انحراف معیار جریان افزایش می‌یابد و تغییر  $L_v$  در لایه بالایی تأثیر بیشتری بر روی تغییرات حجم آب تراوش شده دارد. همچنین نتایج نشان داد که میانگین مقدار گرادیان خروجی بزرگ‌تر از مقدار حاصل از تحلیل قطعی بود و افزایش فاصله خودهمبستگی در جهت عمودی، میانگین مقدار گرادیان خروجی را کاهش می‌دهد. اثر تغییرات  $L_v$  بر مقدار گرادیان خروجی در لایه بالایی بیشتر از لایه پایینی است و با افزایش  $L_v$  لایه بالایی، انحراف معیار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد و میانگین تغییرات فشار برکنش وارد بر سازه تحت تأثیر تغییرات  $L_v$  و  $L_h$  قرار ندارد، اما انحراف معیار آن با تغییرات  $L_v$  افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که میانگین و انحراف معیار نرخ جریان تراوشی با افزایش فاصله همبستگی افقی در لایه‌های بالا و پایین افزایش می‌یابد که ناشی از تشکیل مسیرهای افقی عبور جریان است. با افزایش طول افقی همبستگی میزان دبی خروجی به سمت میزان قطعی آن پیش می‌رود که به دلیل همگن شدن محیط مورد مطالعه با افزایش  $L_h$  است. در نهایت گرادیان هیدرولیکی خروجی با افزایش  $L_h$  افزایش می‌یابد و برای تمامی مقادیر  $L_h$ ، گرادیان هیدرولیکی خروجی بیشتر از مقدار قطعی است.

#### ۷- مراجع

- Ahmed AA, "Stochastic analysis of free surface flow through earth dams", Computers and Geotechnics, 2009, 36 (7), 1186-1190.
- Baecher GB, Christian JT, "Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering", Wiley, New York, 2003.
- Benson CH, "Probability Distributions for Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1993, 119 (3), 471-486.

EXTENDED ABSTRACT

## Uncertainty Analysis of Seepage Flow in Soil Foundation of Small Concrete Dam

Ahmad Sharafati <sup>a,\*</sup>, Seyyed Behnam Mirfakhraee <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Engineering Department, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 25 January 2018; Accepted: 22 September 2018

**Keywords:**

Seepage, Soil foundation, Monte Carlo, Uncertainty.

### 1. Introduction

Hydraulic conductivity of soil has spatial variability due to complex configuration of soil. Therefore, regarding constant hydraulic conductivity in seepage analysis of soil foundation has high uncertainty.

### 2. Methodology

In this study, seepage analysis of soil foundation in the small concrete dam was analyzed by considering uncertainty of hydraulic conductivity. In this respect, spatial variability of two-layer soil foundation was quantified using Monte Carlo simulation (Sharafati and Zahabiyoum 2014; Sharafati and Azamathulla 2018; Sharafati et al. 2018). Also, random variables were generated using Cholesky method and autocorrelated function of each layer.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Spatial variation of mean and standard deviation of seepage flow

Probability distribution function of seepage variables was derived using Monte Carlo simulation. In this respect the sample diagram is shown in Fig. 1. As shown in Fig. 1, it was revealed that the seepage flow computed based on stochastic method is more than deterministic approach. Also, the maximum and minimum ratio of stochastic based flow respect to deterministic based flow are 2 and 0.4, respectively.

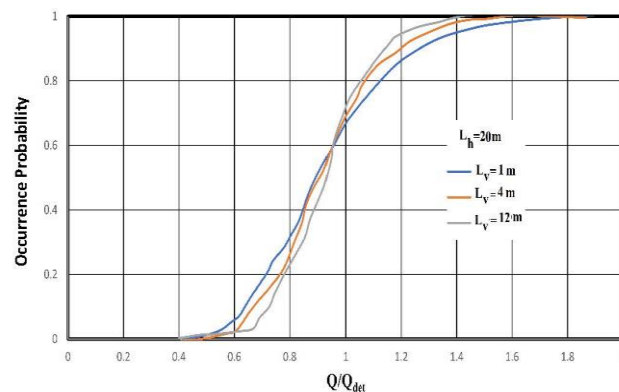


Fig. 1. Probability distribution function of seepage flow based on various values of LV

\* Corresponding Author

E-mail addresses: asharafati@srbiau.ac.ir (Ahmad Sharafati), b\_mirfakhraee@yahoo.com (Syyed Behnam Mirfakhraee).

#### **4. Conclusions**

The obtain result shown, in stochastic evaluation approach of seepage flow, the values of seepage flow and hydraulic gradient have more variation but the uplift force was independent of hydraulic conductivity variation.

#### **5. References**

- Sharafati A, Zahabiyoun B, "Rainfall threshold curves extraction by considering rainfall-runoff model uncertainty", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (10), 2014, 6835-6849.
- Sharafati A, Azamathulla HM, "Assessment of Dam Overtopping Reliability using SUFI Based Overtopping Threshold Curve", *Water Resources Management*, 32 (7), 2018, 2369-2383.
- Sharafati A, Yasa R, Azamathulla HM, "Assessment of Stochastic Approaches in Prediction of Wave-Induced Pipeline Scour Depth", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 9 (4), 2018, 04018024.