

## تأثیر پارامترهای مقاومتی ناپیوستگی‌ها بر میزان آبستگي حوضچه آرامش پشت سد

سید مصلح افتخاری<sup>۱\*</sup>، علیرضا باغبانان<sup>۲</sup>، آناهید قمری مود<sup>۲</sup>

۱- گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱

(\* نویسنده مسئول: mosleh.eftkhari@modares.ac.ir)

### چکیده

یکی از راه کارهای بررسی پدیده‌ی آبستگي بررسی عددی این پدیده است. نرم‌افزارهای متعارف مورد استفاده در این زمینه توانایی مدل کردن توده سنگ را ندارند از این رو، در این تحقیق تأثیر پارامترهای مقاومتی توده سنگ بر آبستگي حوضچه‌ی آرامش پشت سد مورد واکاوی قرار گرفته است. بدین منظور در ابتدا توسط نرم افزار FLOW-3D محاسبات مربوط به سیال انجام گرفته است. سپس خروجی مناسب از این نرم افزار استخراج و ادامه ی تحلیل در نرم افزار المان مجزای UDEC انجام گرفته است. نتایج بیانگر تأثیر عمیق این پارامترها بر شکل و میزان آبستگي می‌باشد. به صورتی که افزایش مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها از عمق و عرض آبستگي بحرانی و همچنین از گستره‌ی آن می‌کاهد. گرچه شدت تأثیر آن‌ها بر کاهش عمق و عرض آبستگي بحرانی و گستره‌ی آن یکسان نیست. در ادامه معادلاتی جهت پیش بینی عمق و عرض آبستگي پیشنهاد گردیده است.

آبستگي، حوضچه آرامش، سرریز آزاد، مقاومت توده سنگ، روش المان مجزا

### واژگان کلیدی

### ۱- مقدمه

آبستگي قابل ملاحظه باشد به گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار داده و یا موجب تخریب آن‌ها گردد. به منظور کاهش آبستگي در پشت سدها از حوضچه‌ی آرامش استفاده می‌شود. حوضچه آرامش سازه‌ای است که برای اتلاف انرژی جریان در پایین‌دست سرریزها، تندآب‌ها و پایانه‌ها احداث می‌شود. در اکثر حوضچه‌های آرامش برای اتلاف انرژی از پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود. معمولاً کف حوضچه‌ها افقی است اما گاهی برای صرفه‌جویی در هزینه خاکبرداری کف آن را شیب‌دار می‌سازند. در شکل ۱ نمایی از حوضچه‌ی آرامش پشت سد نشان داده شده است. ساختار هیدرولیکی

آبستگي، جایجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری است. آبستگي ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان و یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. از نگاهی دیگر، آبستگي سنگ بستر یک فرایند دائم دینامیکی است که درهم شدگی سنگ، متلاشی شدن آن و راندن آن از مکان اولیه به مکانی دیگر را در بر می‌گیرد [۱]. آبستگي اطراف سازه به مرور زمان به پی سازه آسیب رسانده و باعث تخریب سازه می‌شود. اهمیت بررسی پدیده آبستگي زمانی آشکار می‌گردد که عمق

توجه‌ای به همراه داشته باشد. براساس مدل جامعی که توسط بولارت ارائه شده است، فرایند تکامل آبستنگی سنگ در طی زمان شامل سه قسمت است [۳]:

- شکافتن سنگ
- بالا آمدن بلوک سنگی از کف حوضچه آرامش
- پوسته پوسته شدن سنگ در دیواره ی حوضچه آرامش

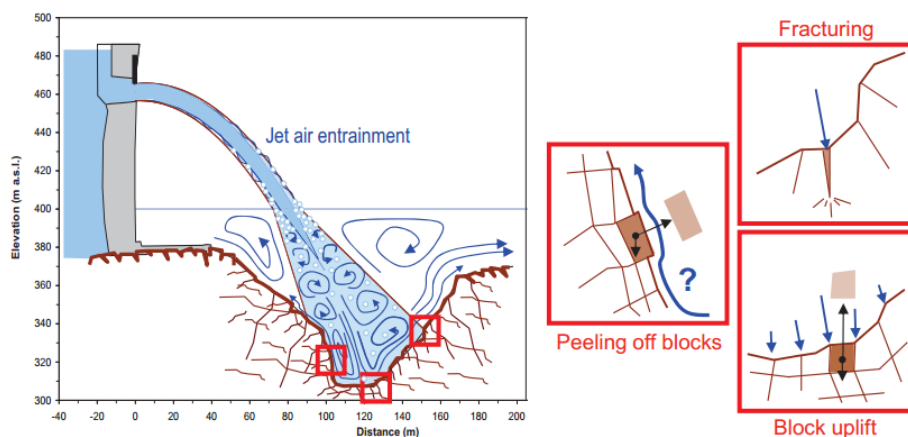
این موضوع در شکل ۲ به نمایش در آمده است.

ریزش آب اضافه از سرریز سد مدت‌ها است که یک مساله‌ی مهندسی مهم به شمار می‌رود. جریان آب به سمت پایین رودخانه باعث آبستنگی پی سد و پایین دست رودخانه می‌شود. در طول گذشت زمان این فرایند باعث آسیب ساختار سد می‌شود. بنابراین پیش بینی زمان فرسایش و تخمین عمق نهایی آبستنگی باید صورت گیرد.

جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی اغلب به صورت جت می‌باشد که ممکن است موجب تغییرات زیادی در اطراف این سازه‌ها گردد و خسارت‌های سازه‌ای و زیست محیطی قابل



شکل ۱- نمایی از حوضچه‌ی آرامش و سرریز سد [۲].



شکل ۲- مراحل آبستنگی بلوک‌های سنگی [۳]

پدیده‌ی آبشستگی در بسترهای خاکی پرداخت. بنابراین در این تحقیق سعی می‌شود تا در ابتدا جریان در نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شود و سپس میدان فشار هیدرولیکی وارد بر کف حوضچه که ناشی از جت ریزشی سرریز آزاد است، از این نرم‌افزار استخراج و به صورت نیروهای هیدرومکانیکی وارد نرم‌افزار UDEC شود.

## ۲-۱- مدل‌سازی فشار جریان سرریز با استفاده از

### نرم‌افزار FLOW-3D

نرم افزار Flow-3D یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه ی دینامیک سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است [۱۱]. اخیراً، این نرم‌افزار توانسته در تحقیقات و صنعت کاربرد زیادی پیدا کند. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را دارد و محدوده‌ی کاربردی بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد. معادلات حاکم در این نرم‌افزار، معادلات ناویر-استوکس و معادله‌ی بقای جرم است. نرم افزار Flow-3D شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آب‌های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفستگی، محیط‌های متخلخل و غیره است. این نرم‌افزار در زمینه‌هایی چون ریخته‌گری، مهندسی فرآیند، هیدرولیک، محیط‌زیست، هوافضا، علوم دریایی، نفت، گاز و غیره کاربرد دارد.

پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق براساس سد بهشت‌آباد می‌باشد و این سد در دسته بندی سدهای بزرگ قرار می‌گیرد، ارتفاع سد در این تحقیق بیش از پنجاه متر در نظر گرفته می‌شود. سه نمونه‌ی یکسان سد با ارتفاع ۸۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ متر در این تحقیق در نظر گرفته شده است. بدین منظور قسمتی از بدنه‌ی سد در نرم‌افزار AutoCad-3D طراحی و به صورت فایل STL وارد نرم‌افزار FLOW-3D شد. پارامترهای ورودی در این نرم‌افزار در جدول ۱ آمده است.

تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بررسی پدیده آبشستگی و تخمین میزان آبشستگی ارائه شده است [۴-۱۰]. از این میان روابط تجربی بسیاری پیشنهاد شده است که با توجه به تعداد زیاد پارامترهای موثر در بررسی آبشستگی، احتمال خطا در میزان برآورد آبشستگی با استفاده از این روابط را بالا می‌برد و با توجه به این امر که در بیشتر حالات جنس بستر حوضچه‌ی آرامش سنگی می‌باشد. به منظور تخمین ابعاد آبشستگی ضروری است که حوضچه آرامش به صورت محیط سنگی مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق پیشرو، به بررسی میزان آبشستگی در حوضچه آرامش پشت سد که بر اثر نیروی هیدرومکانیک ناشی از جت مایل بر روی محیط سنگی ایجاد می‌شود، پرداخته شده است. با توجه به آنکه مقاومت توده‌سنگ به شدت متأثر از پارامترهای مقاومتی ناپیوستگی است و در روابط تجربی گذشته، این موضوع مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین مدل‌سازی محیط شکسته‌ای مانند سنگ در نرم‌افزارهای متعارفی که برای تحلیل آبشستگی استفاده می‌شود مقدور نیست. از این‌رو، در تحقیق پیشرو سعی می‌شود که با مدل‌سازی عددی بتوان درکی از تأثیر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ بر آبشستگی سنگ بستر حوضچه‌ی آرامش پشت سد بدست آورد. بدین منظور در این تحقیق در ابتدا جریان سیال در نرم‌افزار FLOW-3D شبیه سازی و سپس پارامترهای مورد نیاز از آن استخراج و وارد نرم‌افزار المان مجزای UDEC خواهد شد.

## ۲- مدل‌سازی آبشستگی حوضچه آرامش پشت سد

هرچند در نرم‌افزار FLOW-3D امکان مدل کردن آبشستگی به صورت مجزا وجود دارد ولی در این برنامه و نرم‌افزارهای تجاری مشابه، قابلیت مدل کردن توده‌سنگ میسر نیست و صرفاً می‌توان با معرفی پارامترهایی همچون چگالی مصالح بستر، قطر موثر، زاویه ایستایی مصالح بستر و غیره به بررسی

جدول ۱- پارامترهای اساسی ورودی به نرم‌افزار

مدت زمان تحلیل	نوع سیال	نوع حل گر	نوع جریان	مدل آشفستگی
۲۰ مشخصه time scale	غیر قابل تراکم	مضاعف	ویسکوز	RNG

مدت زمان تحلیل، زمان لازم برای تحلیل و شبیه‌سازی مسئله است. در FLOW-3D محاسبه‌ی زمان تحلیل مشکل است.

به زمان، محیط‌های ناپیوسته را تحلیل می‌نماید. در نرم‌افزار UDEC محیط سنگی به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا تعریف می‌شود که ناپیوستگی‌ها (مثل درزه‌ها) به عنوان شرایط مرزی بین بلوکی در آن‌ها عمل می‌کنند و جابجایی برشی در امتداد این ناپیوستگی‌ها و نیز چرخش بلوک‌ها می‌تواند انجام گیرد. فشار سیال وارد بر کف حوضچه آرامش پشت سد از نرم‌افزار FLOW-3D استخراج و برای ادامه تحلیل وارد نرم‌افزار UDEC می‌شود. در این نرم‌افزار یک مدل با ابعاد ۳۰ متر در ۷۰ متر ساخته و به منظور شبیه‌سازی با مدل واقعی زمین، اجرا و تعادل اولیه در این مدل بررسی گردیده است.

به منظور مدل‌سازی، شبکه‌ی شکستگی‌های برداشت شده، آنالیز شده‌اند. بدین منظور ناپیوستگی‌های برداشت شده وارد نرم‌افزار DIPS شده و دسته درزه‌های منطقه مشخص گردیده است (شکل ۴). همانگونه که ملاحظه می‌شود لایه‌بندی و گسل نیز در این منطقه وجود دارند.

پس از مشخص شدن شماره دسته درزه‌ها، سایر مشخصات برداشت شده‌ی درزه‌ها را براساس شماره دسته درزه مرتب و توسط نرم‌افزار Minitab آنالیز و مقادیر میانگین و انحراف از معیار شیب، طول اثر، گپ و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به صورت مجزا برای هر دسته درزه مشخص می‌شوند (جدول ۲).

بدین نحو می‌توان شبکه شکستگی‌ها را براساس دسته درزه‌های موجود وارد نرم‌افزار UDEC کرد. در این تحقیق رفتار بلوک‌های سنگی بکر بر اساس مدل رفتاری الاستیک و رفتار ناپیوستگی‌ها براساس مدل رفتاری موهر-کلمب با لغزش سطحی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ پارامترهای سنگ بکر و توده سنگ مورد استفاده در مدل آمده است. در شکل ۵ نمایی از بلوک‌های تشکیل شده در مدل نمایش داده شده است.

بعد از ایجاد تعادل اولیه در مدل، خروجی میدان فشار برداشت شده از نرم‌افزار FLOW-3D بر روی مدل ساخته شده در UDEC اعمال شده است. بررسی اولیه نشان داد که حجم مدل ساخته شده بزرگتر از محدوده‌ی تحت تاثیر آبشستگی است. همچنان که در شکل ۶ نمایان است، جابجایی محسوسی در اعماق زیاد وجود ندارند، بنابراین بلوک‌های بسیار عمیق تحت تاثیر آبشستگی قرار ندارند. از اینرو برای

تخمین این زمان وقتی مورد قبول است که سیستم به حالت پایدار برسد. براساس یک اصل، زمان مورد نیاز بین ۱۰ تا ۲۰ مشخصه‌ی مقیاس زمانی است. مقیاس زمانی، زمان مورد نیاز برای عبور سیال از سیستم است و براساس سرعت سیال سنجیده می‌شود [۱۱].

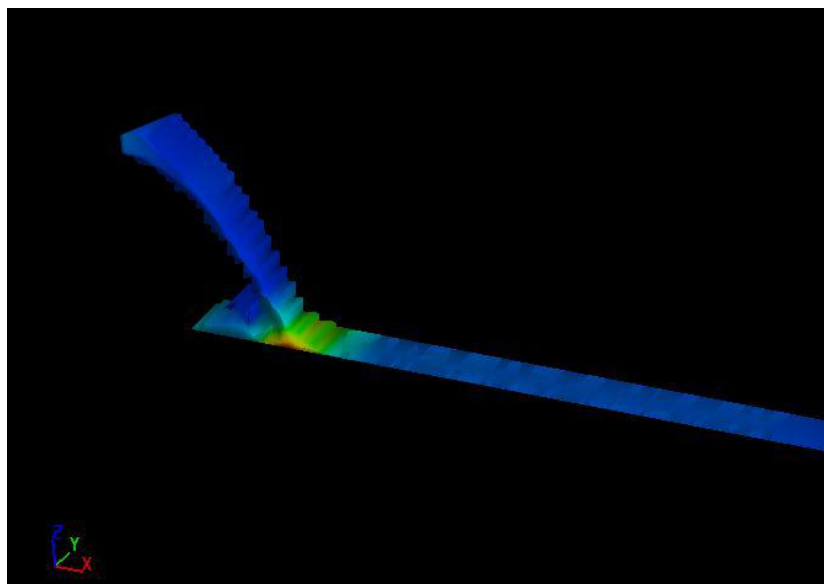
حل با دقت مضاعف جواب دقیق‌تری را به همراه خواهد داشت ولی حجم بیشتری از پردازنده‌ی سیستم را اشغال خواهد کرد. نوع سیالات می‌تواند ویسکوز و یا غیر ویسکوز باشد. سیالات ویسکوز خود به دو نوع تقسیم می‌شوند: سیالاتی که نرخ تنش برشی با کرنش برشی در آن‌ها مقدار ثابتی است که در حالت پیش فرض در نرم‌افزار FLOW-3D به عنوان سیال ویسکوز معرفی می‌گردند [۱۲]. سیالاتی که نرخ تنش برشی با کرنش برشی در آن‌ها مقدار ثابتی نیست و متغیر است مانند خمیر دندان که در نرم‌افزار FLOW-3D به صورت Thixotropic Flow تعریف می‌شوند. این نوع سیال در حالتی که ویسکوزیته تابع زمان است استفاده می‌شود و جایی در تحقیق پیش رو نخواهند داشت [۱۱]. جریان می‌تواند آرام و یا آشفته باشد که یکی از مشخصات جریان آرام و آشفته عدد رینولدز است. جریان آشفته بسته به نوع مسئله می‌تواند از نوع جریان صفر معادله‌ای، تک معادله‌ای و دو معادله‌ای انتخاب شود. بهترین شبیه‌ساز آشفستگی براساس معادلات دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  و RNG است [۱۱]. برآورد آشفستگی براساس مدل RNG نیاز به تعریف پارامتر خاصی ندارد و تمامی پارامترها برحسب نوع مسئله به صورت دینامیکی توسط خود شبیه‌ساز محاسبه می‌شود. به کارگیری این نوع مدل آشفستگی برای شبیه‌سازی آبشستگی به شدت توصیه شده است [۱۱]. پس از انتخاب اندازه‌المان مناسب که حاصل چندین بار سعی و خطا و شبیه‌سازی‌های متعدد است، مدل اصلی شبیه‌سازی و پارامترهای مورد نیاز از آن استخراج شده است. در شکل ۳ تصویر مرتبط با آبشار ناشی از سقوط آزاد مشاهده می‌شود.

## ۲-۲- مدل‌سازی هیدرومکانیکی آبشستگی با

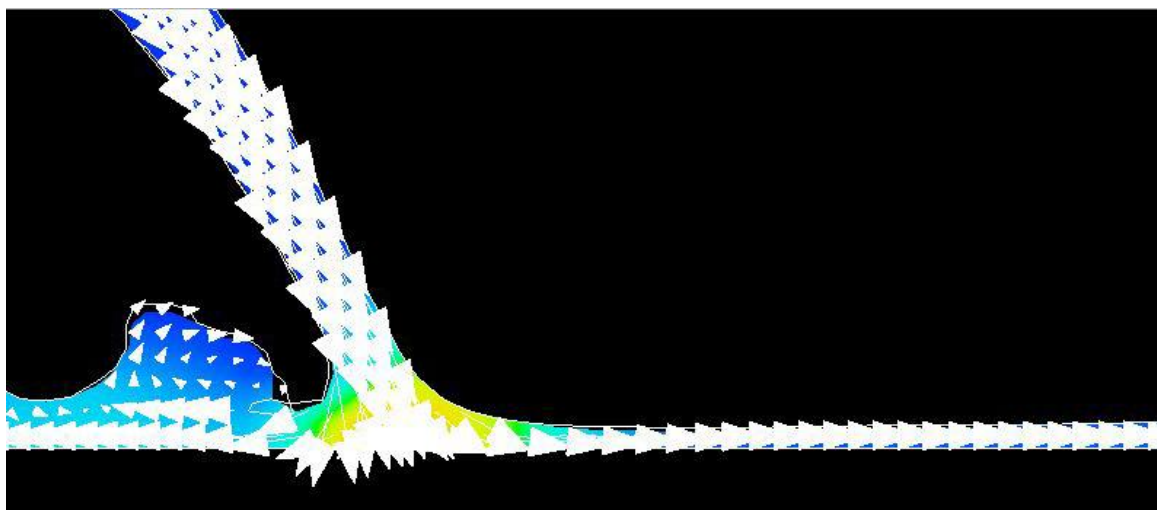
### استفاده از نرم‌افزار UDEC

نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی دو بعدی می‌باشد و براساس محاسبات لاگرانژین عمل می‌کند [۱۲]. این نرم‌افزار، از ویژگی‌های روش اجزا مجزا (Distinct Element Method) پیروی می‌نماید و بر اساس روش حل صریح وابسته

کاهش زمان محاسبه و تحلیل مدل اشباع از سیال در UDEC در طول در ۶ متر عرض (عمق) استفاده شده است. که بسیار زمان بر است، از مدل کوچک تر با ابعاد ۴۰ متر

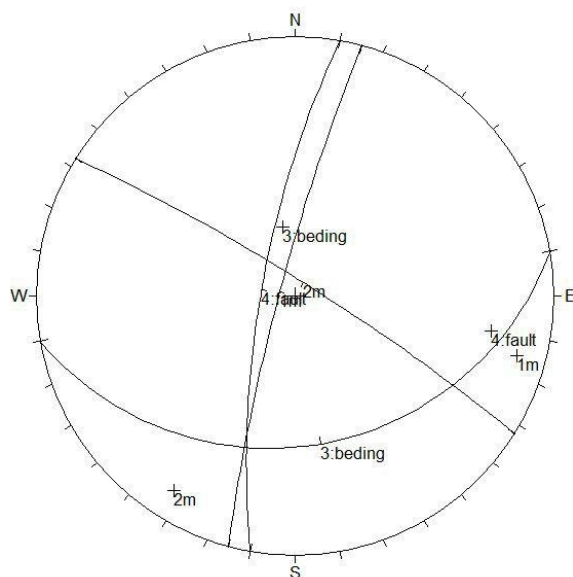


(الف)



(ب)

شکل ۳- (الف) مدل سرریز آزاد در نمای سه بعدی (ب) نمایی نزدیک از آشفتگی جریان در نقطه ی برخورد جت آب با کف مدل



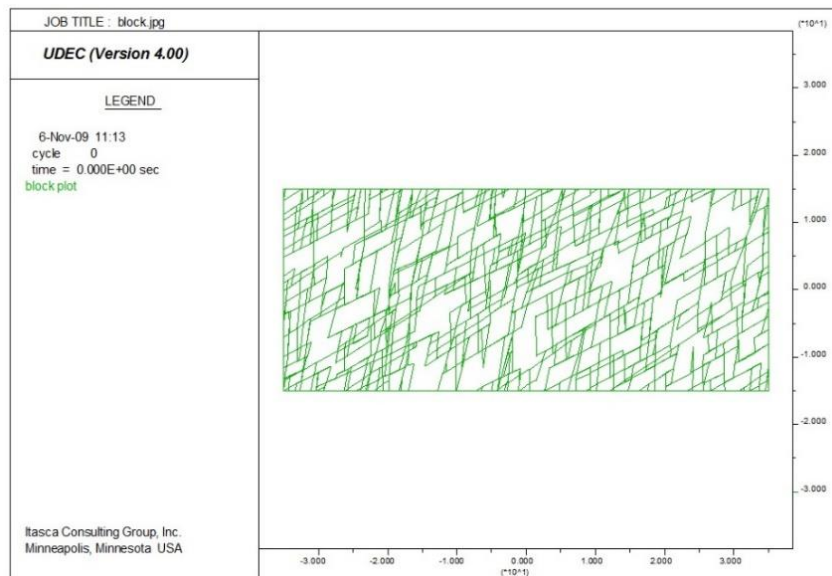
شکل ۴- نمایی از ناپیوستگی های موجود در منطقه

جدول ۲- مشخصات ناپیوستگی های برداشت شده از منطقه ی سد بهشت آباد [۱۳]

نوع ناپیوستگی	میانگین شیب (درجه)	انحراف از معیار شیب (درجه)	میانگین طول اثر (متر)	انحراف از معیار طول اثر (متر)	میانگین فاصله ناپیوستگی (متر)	انحراف از معیار فاصله ناپیوستگی (متر)
دسته درز ۱	۸۳	۸.۷۲	۸	۳	۱.۷۳	۰.۶
دسته درز ۲	۶۷	۸.۱۲	۶.۴۵	۲.۳۴	۱.۵	۰.۷۲
لایه بندی	۳۰	۱	۱۷	۵	۳	۰.۹۸
گسل	۷۵	۱	۲۰	۵	۱۵	۱.۱

جدول ۳- پارامترهای اختصاص داده شده به مدل [۱۳]

دانسیته (kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسون	چسبندگی درزه (MPa)	زاویه اصطکاک درزه	سختی نرمال (GPa/m)	سختی برشی (GPa/m)
۲۶۵۰	۱۱.۸	۰.۳	۰.۲-۱.۱	۲۰-۵۰	۱۰	۲



شکل ۵- نمایی از بلوک‌های تشکیل‌شده در مدل

حوضچه در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی هیدرولیکی ثابت فرض شده است. همانگونه که در شکل ۱۱ مشخص است با افزایش مقدار چسبندگی مقاومت سنگ در برابر آب شستگی بالا می‌رود. برای مدل‌های ۳ و ۴ این موضوع به نحوی است که حتی میتوان پدیده‌ی آبشستگی را در مدل منتفی دانست (صرفاً فضای خالی بین دو بلوک در مدل ایجاد شده است که در شکل با رنگ‌های آبی و فیروزه‌ای نمایان است). در شکل ۱۱ - (ب) محدوده‌ای که آب شستگی مدل‌های ۳ و ۴ در آن قرار دارند بزرگ‌نمایی شده است. افزایش مقدار چسبندگی نه تنها از عمق آبشستگی می‌کاهد بلکه بر روی گستره‌ی طولی آن نیز تاثیر می‌گذارد. در شکل ۱۲- (الف) مدل‌های ۵ تا ۸ که بیانگر میزان آبشستگی ناشی از یک سرریز آزاد ۱۱۰ متری است به نمایش درآمده است.

در این حالت نیز به مانند مدل‌های قبلی با افزایش پارامتر چسبندگی درزه‌های سنگ مقاومت سنگ در برابر آبشستگی به شدت افزایش یافته و از گستره‌ی آبشستگی هم به لحاظ عمق و هم به لحاظ طول و پراکندگی کاسته شده است. در قیاس با مدل‌های قبلی که مربوط به سرریز ۸۰ متری بوده‌اند در اینجا پدیده‌ی آبشستگی نمایان‌تر است که به دلیل ارتفاع

### ۳- آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای توده‌سنگ

به طور کلی پایداری توده‌سنگ بسیار متأثر از خواص مکانیکی درزه‌های سنگ است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مکانیکی درزه‌های سنگی، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک آن‌ها انجام گرفت. مقادیر اختصاص داده شده به مدل در جدول ۴ آورده شده است. در اشکال ۷ الی ۱۰ جابجایی بلوک‌های سنگی در تعدادی از این مدل‌ها نشان داده شده است.

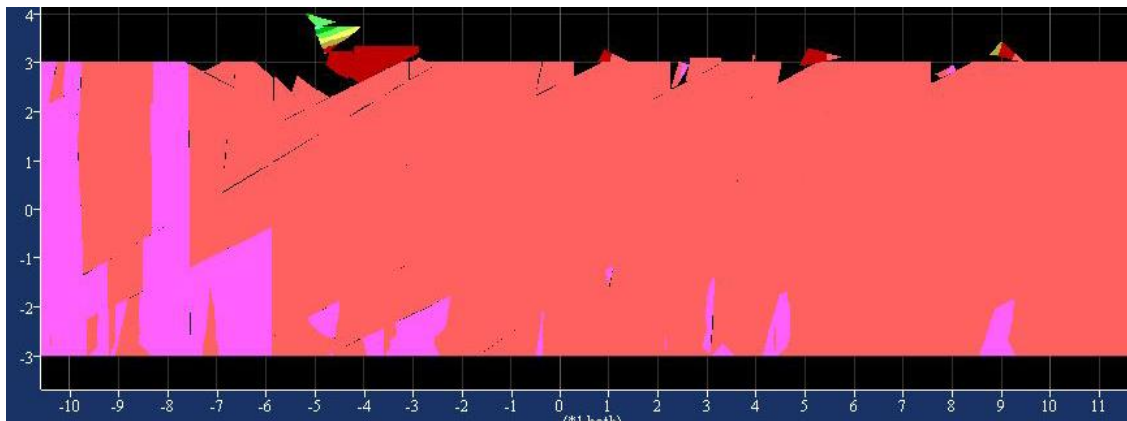
همانگونه که در تصاویر بالا نمایان است آبشستگی صرفاً محدود به نقطه‌ی برخورد آبشار سرریز با کف حوضچه نمی‌باشد بلکه در ادامه‌ی مسیر، حرکت آب بر روی کف حوضچه موجب شسته شدن بلوک‌های سنگی می‌شود. گرچه شدت این موضوع با دور شدن از محل برخورد آبشار با کف کاسته می‌شود.

در اشکال زیر بررسی واضح تری برای فهم تأثیر دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک درزه‌های سنگ انجام گرفته است. در شکل ۱۱- (الف) مدل‌های شماره ۱ تا ۴ با هم در یک نما به نمایش درآمده‌اند. در این مدل‌ها تمامی پارامترها ثابت و فقط پارامتر چسبندگی درزه‌های سنگ تغییر می‌کند. در تمامی این چهار مدل سرریز در ارتفاع ۸۰ متری از کف

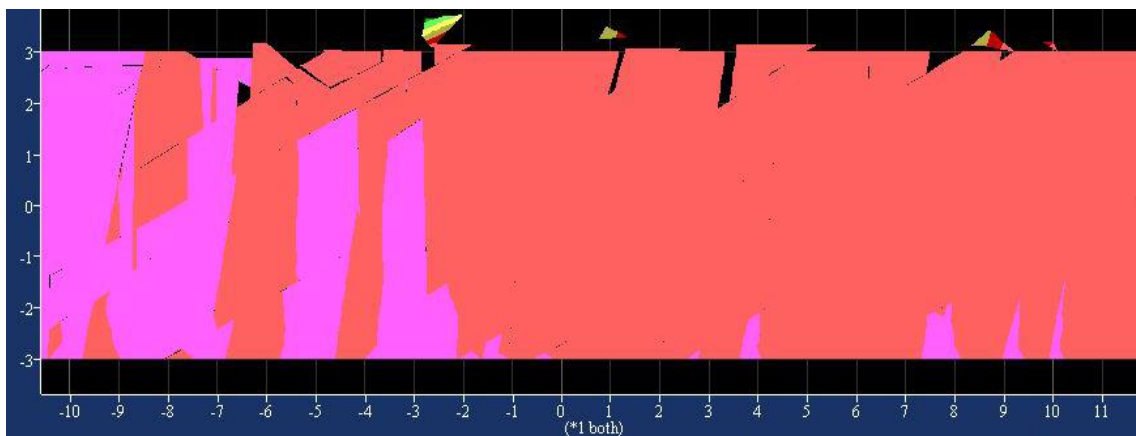
بیشتر سرریز است.

جدول ۴- مقادیر اختصاص داده شده به مدل جهت تحلیل آبستگی

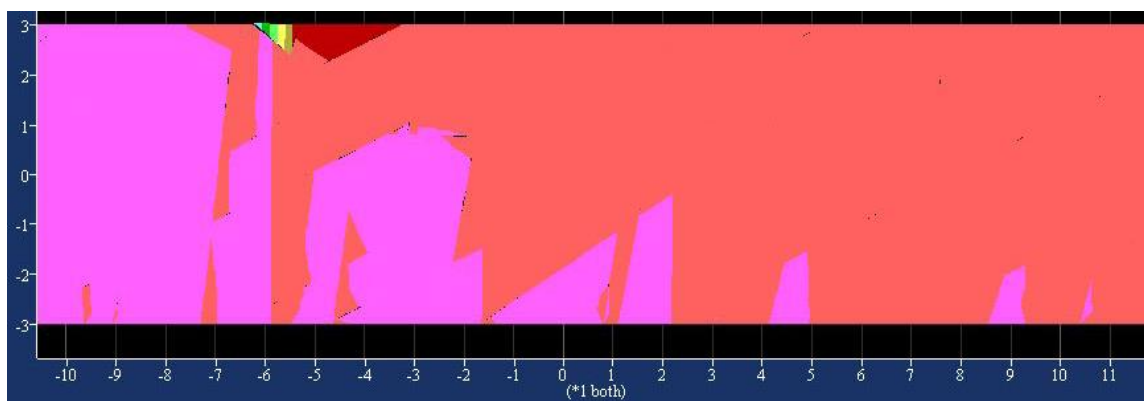
شماره ی مدل	ارتفاع سرریز (m)	زاویه اصطکاک درزه	چسبندگی درزه (MPa)
۱	۸۰	۲۰	۰.۲
۲	۸۰	۲۰	۰.۵
۳	۸۰	۲۰	۰.۸
۴	۸۰	۲۰	۱.۱
۵	۱۱۰	۲۰	۰.۲
۶	۱۱۰	۲۰	۰.۵
۷	۱۱۰	۲۰	۰.۸
۸	۱۱۰	۲۰	۱.۱
۹	۱۵۰	۲۰	۰.۲
۱۰	۱۵۰	۲۰	۰.۵
۱۱	۱۵۰	۲۰	۰.۸
۱۲	۱۵۰	۲۰	۱.۱
۱۳	۸۰	۳۰	۰.۲
۱۴	۸۰	۴۰	۰.۲
۱۵	۸۰	۵۰	۰.۲
۱۶	۱۱۰	۳۰	۰.۲
۱۷	۱۱۰	۴۰	۰.۲
۱۸	۱۱۰	۵۰	۰.۲



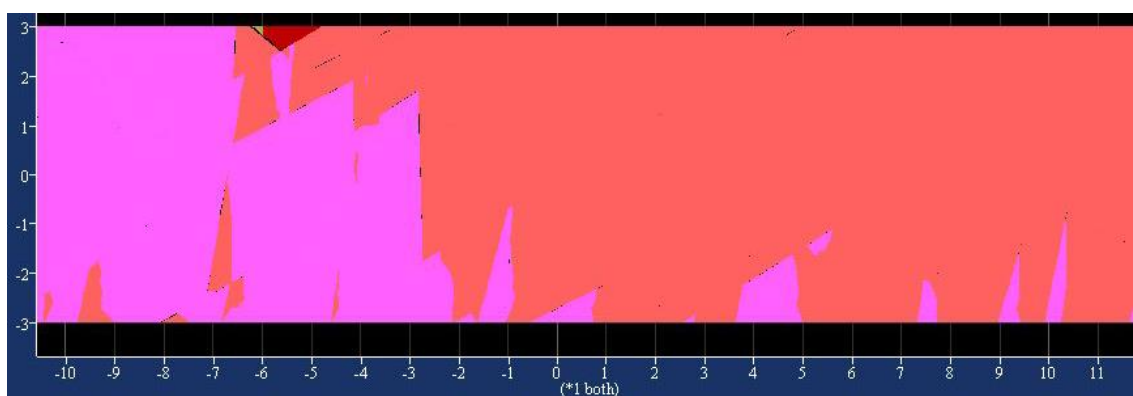
شکل ۷- نمایی از جابجایی بلوک‌ها بر اثر آبستگی در مدل شماره ۱



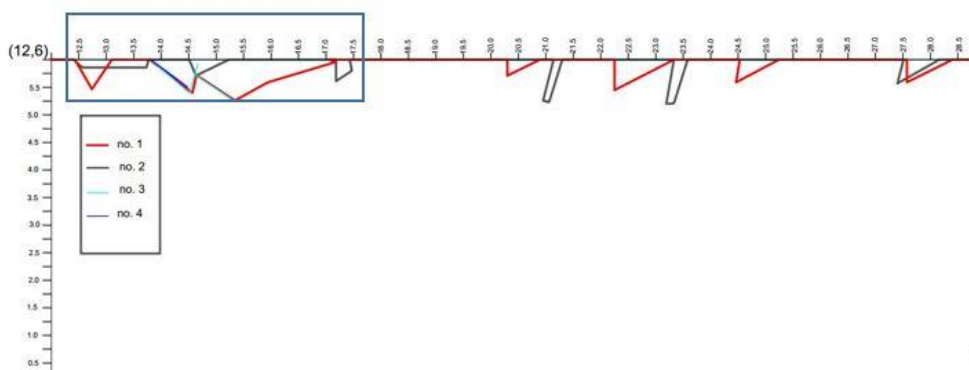
شکل ۸- نمایی از جابجایی بلوک‌ها بر اثر آبستگي در مدل شماره ۲



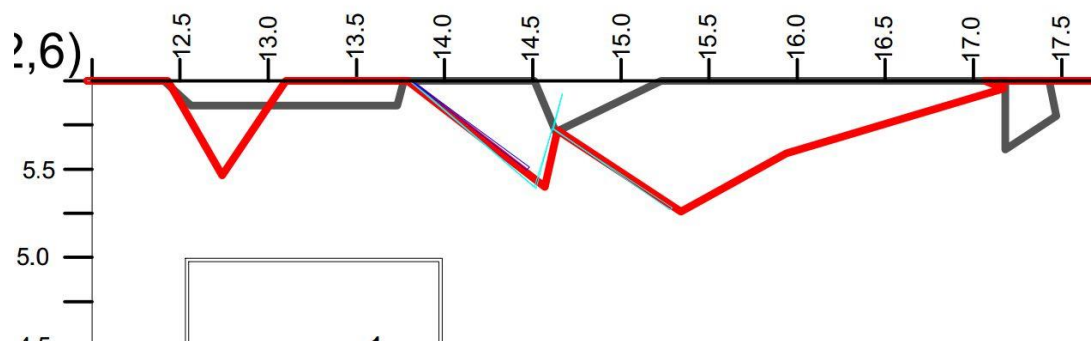
شکل ۹- نمایی از جابجایی بلوک‌ها بر اثر آبستگي در مدل شماره ۳



شکل ۱۰- نمایی از جابجایی بلوک‌ها بر اثر آبستگي در مدل شماره ۴



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- (الف) پروفیل آبستتگی ناشی از سرریز ۸۰ متری مربوط به مدل‌های ۱ تا ۴ (ب) تصویر بزرگ‌نمایی شده از آبستتگی مربوط به مدل‌های ۱ تا ۴

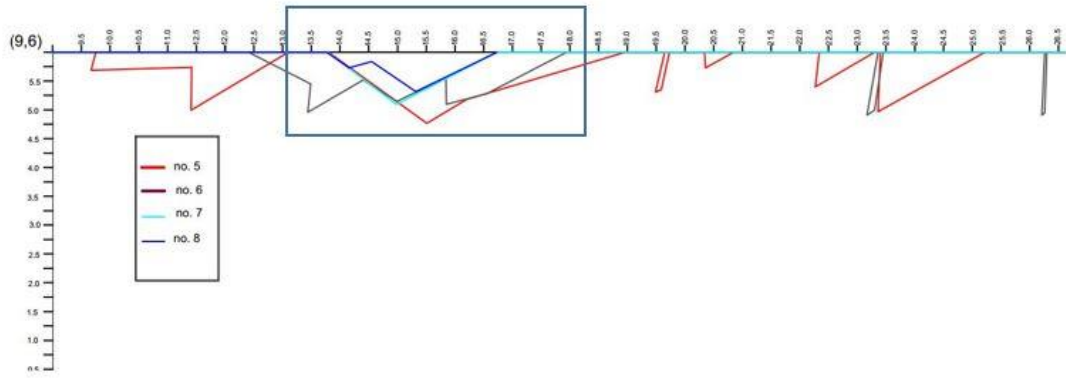
شده‌اند. در این سری از مدل‌ها ارتفاع سرریز آزاد ۸۰ متر از کف حوضچه‌ی سرریز است. همانطوری که در شکل مشخص است افزایش زاویه اصطکاک از مقدار ۲۰ به مقدار ۳۰ موجب کاهش آبستتگی سنگ شده است اما این افزایش مقاومت در مقابل آبستتگی در مدل‌های ۱۴ و ۱۵ که زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ی آن‌ها به ترتیب برابر ۴۰ و ۵۰ است محسوس نیست.

در شکل ۱۸- (الف) خروجی حاصل از ۴ مدل مربوط به سرریز ۱۱۰ متری (مدل‌های ۵ و ۱۶ تا ۱۸) قابل مشاهده است. در اینجا نیز افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی درزه‌های سنگی صرفاً از مقدار ۲۰ به مقدار ۳۰ تاثیر گذار بوده و پس از این مقدار افزایش زاویه اصطکاک تاثیری در نحوه‌ی آبستتگی سنگ‌ها نداشته است.

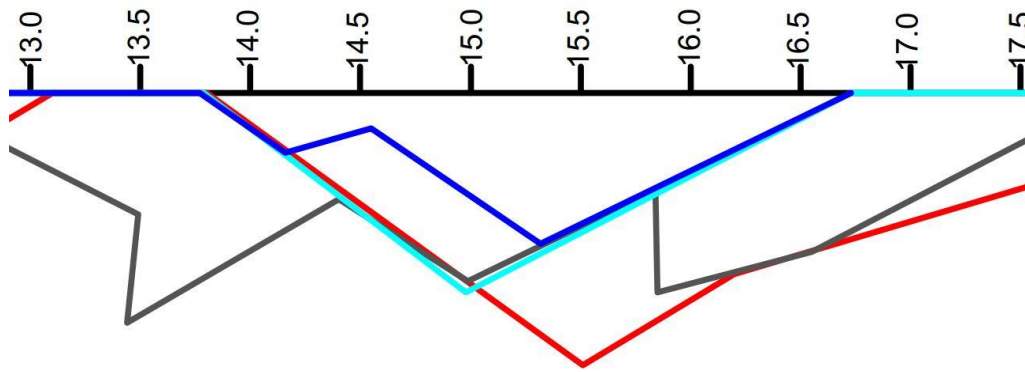
در شکل ۱۳- (الف) چهار مدل مرتبط با سرریز ۱۵۰ متری در یک نما به نمایش درآمده است. در اینجا نیز مشخص است که چسبندگی درزه‌های سنگی نقش مهمی در پایداری بلوک‌ها ایفا می‌کنند. اما نکته‌ی جالب در این مدل عدم پراکندگی چال‌های ایجاد شده بر اثر آبستتگی در مدل‌های شماره ۹ و ۱۰ است.

در ادامه پارامتر چسبندگی ثابت و زاویه‌ی اصطکاک درزه‌های سنگی متغیر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که پارامتر زاویه اصطکاک، ۴ مقدار ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است که به ترتیب مدل‌های شماره ۱، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ است. در اشکال ۱۴ الی ۱۶ تصاویر جایجایی بلوک‌ها در مدل‌های ۱۳ تا ۱۵ نمایش داده شده است.

به منظور بررسی بیشتر و فهم تاثیر زاویه اصطکاک، مدل‌های ۱ و ۱۳ تا ۱۵ در یک نما در شکل ۱۷- (الف) به تصویر کشیده

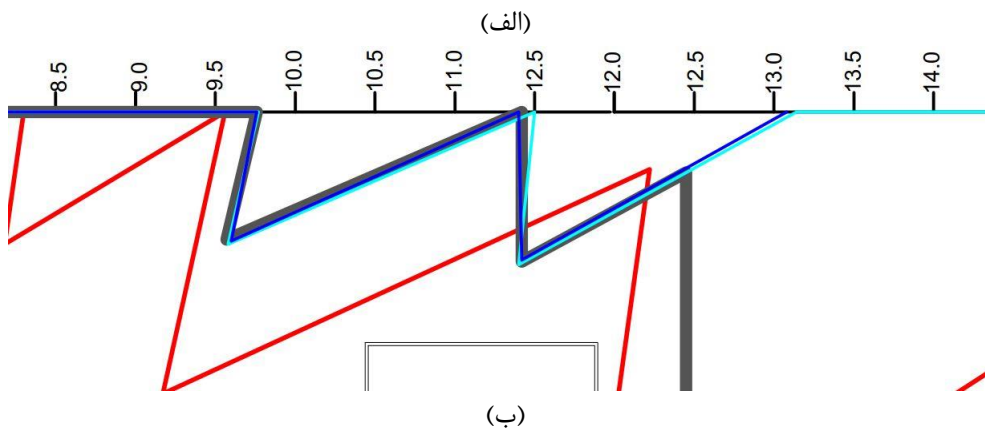
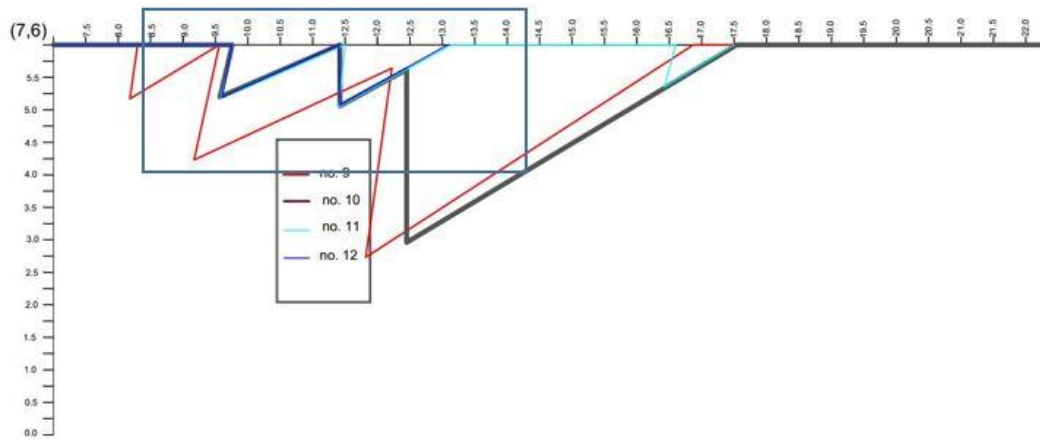


(الف)

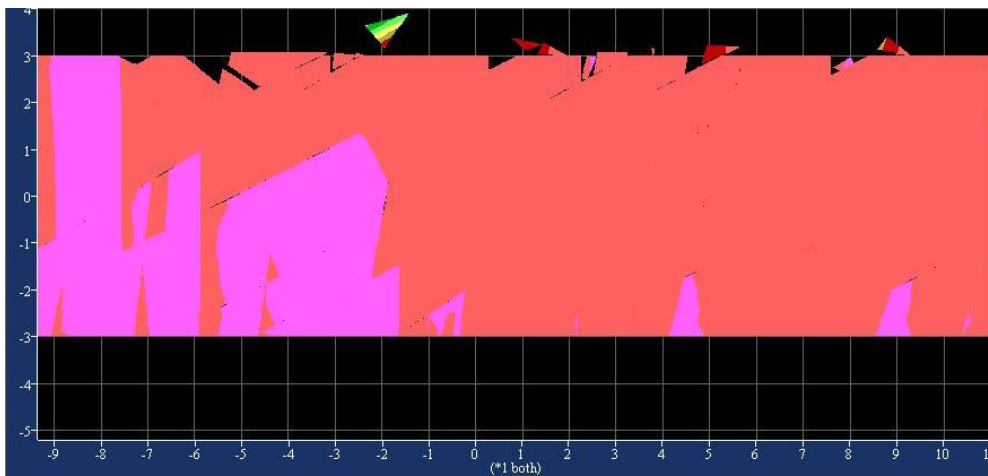


(ب)

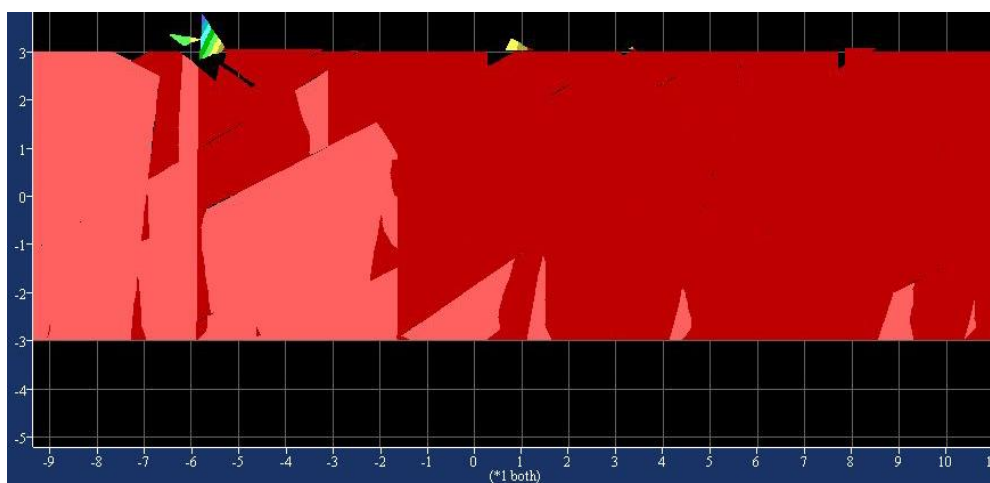
شکل ۱۲- (الف) پروفیل آبستگی ناشی از سرریز ۸۰ متری مربوط به مدل های ۵ تا ۸ (ب) تصویر بزرگنمایی شده از همپوشانی محل های آبستگی هر چهار مدل مرتبط با مدل های ۵ تا ۸



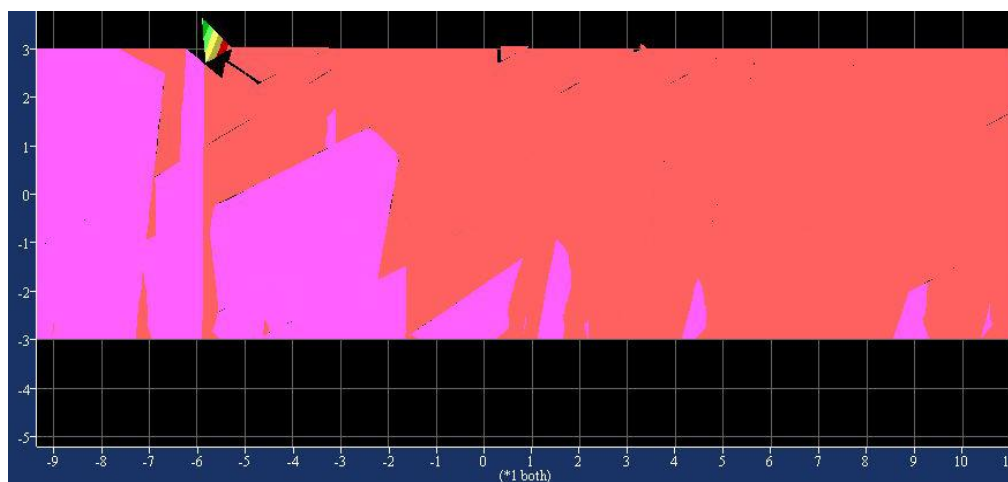
شکل ۱۳- (الف) پروفیل آبشستگی ناشی از سرریز ۸۰ متری مربوط به مدل‌های ۹ تا ۱۲ (ب) تصویر بزرگ‌نمایی شده از هم‌پوشانی محل‌های آبشستگی هر چهار مدل مرتبط با مدل‌های ۹ تا ۱۲



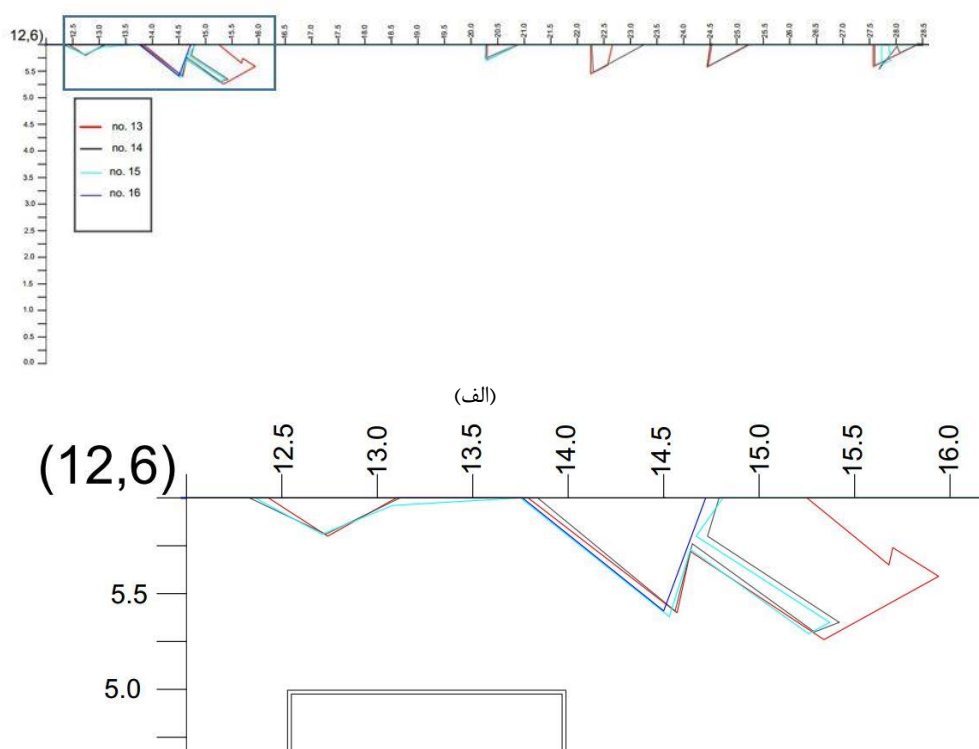
شکل ۱۴- نمایی از جایابی بلوک‌ها بر اثر آبشستگی در مدل شماره ۱۳



شکل ۱۵- نمایی از جابجایی بلوک‌ها بر اثر آبستنگی در مدل شماره ۱۵



شکل ۱۶- نمایی از جابجایی بلوک‌ها بر اثر آبستنگی در مدل شماره ۱۶



شکل ۱۷- (الف) پروفیل آبخستگی ناشی از سرریز ۸۰ متری مربوط به مدل‌های ۱ و ۱۳ تا ۱۵ (ب) تصویر بزرگ‌نمایی شده از هم‌پوشانی محل‌های آبخستگی هر چهار مدل مرتبط با مدل‌های ۱ و ۱۳ تا ۱۵

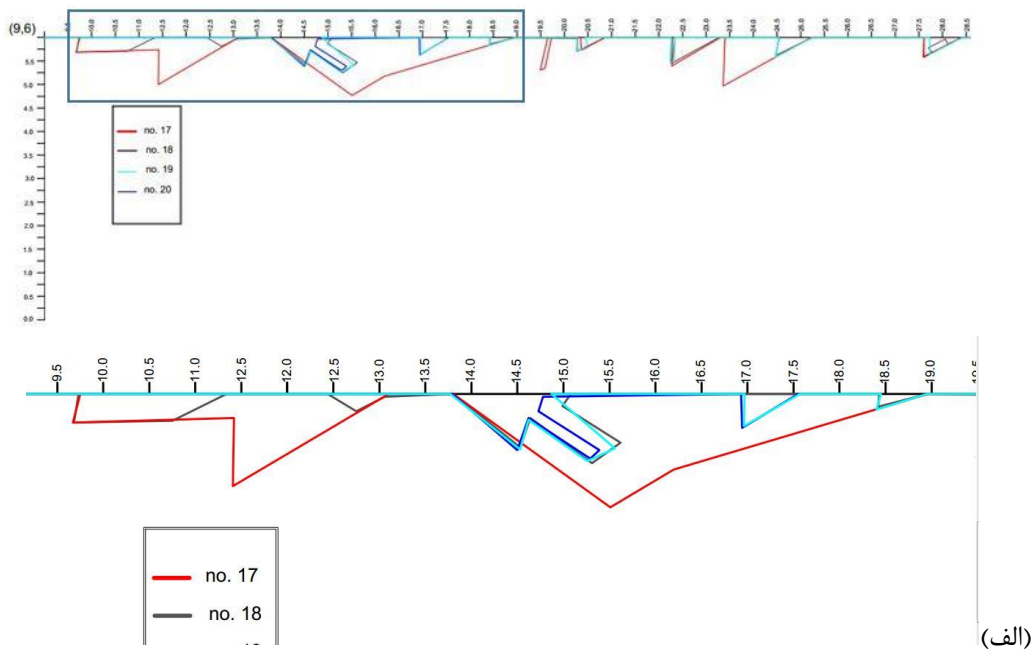
است که در حد بالای پارامتر اصطکاک برای درزه‌های سنگی یعنی ۵۰ درجه، در ارتفاع سرریز ۸۰ متری همچنان آبخستگی وجود دارد (شکل ۱۷-الف)).

مقادیر ذکر شده شامل ارتفاع سد، عمق آبخستگی، عرض آبخستگی، گستره آبخستگی و همچنین پارامترهای چسبندگی درزه و زاویه اصطکاک داخلی درزه با استفاده از نرم‌افزار سیگماپلات تحلیل شده و کنتره‌های مربوط به عمق آبخستگی نسبت به تغییرات ارتفاع، زاویه اصطکاک و چسبندگی در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشخص شده‌اند. همانگونه که در شکل ۱۹ ملاحظه می‌شود کاهش مقدار چسبندگی افزایش پنج برابری (۵۰٪) عمق آبخستگی را در پی دارد.

مقادیر عمق و عرض آبخستگی بحرانی و همچنین گستره آن برای هر مدل در جدول ۵ نشان داده شده است.

در این تحقیق سعی بر بررسی روند و میزان آبخستگی در محیط سنگی بوده است، مقدار میانگین اندازه‌ی قطر معادل بلوک‌های جابجا شده که باعث ایجاد حفره‌ی آبخستگی شده‌اند برابر ۱۰۳ میلی‌متر است که قابل مقایسه با میانگین اندازه‌ی قطر دانه‌های خاک موجود در منابع [۱۴-۱۶] نیست. بنابراین روند آبخستگی و همچنین روابط ارائه شده در این تحقیق را نمی‌توان با روابط موجود برای محیط خاکی مقایسه کرد.

با افزایش مقدار چسبندگی درزه‌ها از مقدار ۰.۲ MPa تا ۱.۱ MPa در سرریز ۸۰ متری همانند شکل ۱۱-الف) مشخص می‌شود که در مقادیر بالای چسبندگی برای درزه‌های سنگی در این ارتفاع می‌توان آبخستگی را نادیده گرفت این در حالی



(ب)

شکل ۱۸- (الف) پروفیل آبستگی ناشی از سرریز ۸۰ متری مربوط به مدل‌های ۵ و ۱۶ تا ۱۸ (ب) تصویر بزرگ‌نمایی شده از هم‌پوشانی محل‌های آبستگی هر چهار مدل مرتبط با مدل‌های ۵ و ۱۶ تا ۱۸

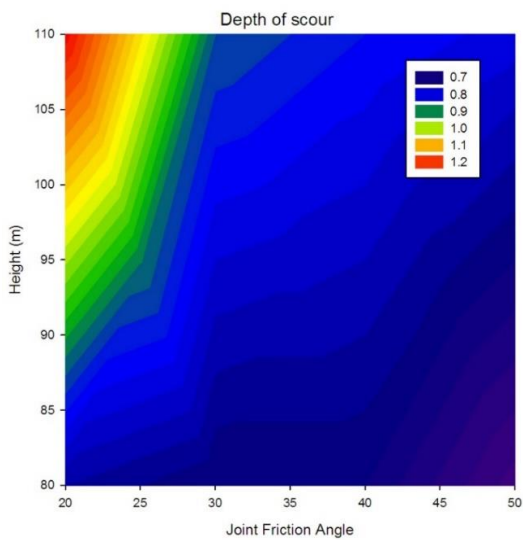
$$D = \frac{4.097}{\left(1 + \left(\frac{C-0.3145}{0.3828}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{H-165.4}{40.109}\right)^2\right)}$$

در معادله ی بالا مقدار C بیانگر چسبندگی بر حسب MPa ، H بیانگر ارتفاع سرریز آزاد بر حسب متر و D نشان دهنده ی عمق آبستگی بر حسب متر است. در شکل ۲۱ این موضوع نشان داده شده است و میزان انطباق  $R^2 = 0.96$  به دست آمده است.

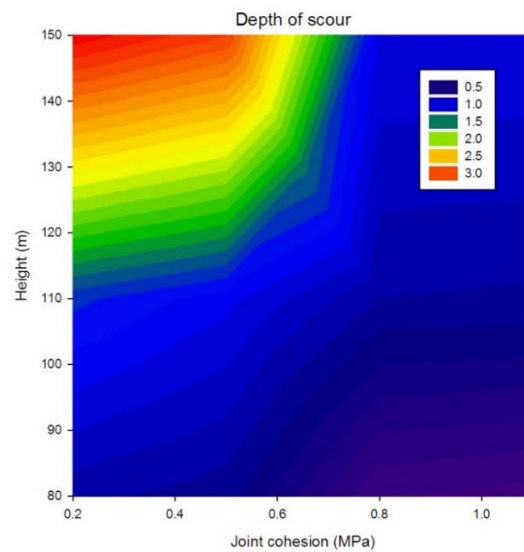
این درحالی است که، چنین افزایشی در شکل ۲۰ ملاحظه نمی‌شود و حساسیت میزان آبستگی به این پارامتر اندک است. بنابراین بنظر می‌رسد می‌توان، از تاثیر این پارامتر بر روی عمق آبستگی صرف نظر کرد. با صرف نظر کردن از این پارامتر می‌توان عمق آبستگی را بر حسب ارتفاع سرریز آزاد سد نسبت به کف حوضچه و مقدار چسبندگی درزه‌های سنگی به صورت زیر در نظر گرفت:

جدول ۵- مقادیر عمق و عرض آبشستگی بحرانی و همچنین گستره‌ی آبشستگی برای هر مدل

شماره‌ی مدل	عمق آبشستگی بحرانی (m)	عرض آبشستگی بحرانی (m)	گستره اثر آبشستگی (m)
۱	۰.۷۴	۳.۴۷	۱۵.۹۷
۲	۰.۶۴	۰.۲۵	۱۵.۹
۳	۰.۱	۰	۰
۴	۰.۰۵	۰	۰
۵	۱.۲۳	۵.۱۶	۲۳.۷۹
۶	۱.۰۴	۵.۲۳	۱۶.۸۲
۷	۰.۷	۲.۹۴	۲.۹۴
۸	۰.۶۸	۲.۹	۲.۹
۹	۳.۲۷	۷.۳۱	۸.۵۷
۱۰	۳	۶.۱۲	۷.۷۸
۱۱	۱	۳.۳۲	۷.۷۳
۱۲	۱	۳.۳	۷.۷۳
۱۳	۰.۷	۲.۴۶	۱۶.۰۷
۱۴	۰.۷	۱.۰۵	۱۵.۵
۱۵	۰.۶۱	۰.۹۸	۰.۹۸
۱۶	۰.۹۲	۲.۶۴	۱۸.۷
۱۷	۰.۹	۱.۱	۱۴.۶۵
۱۸	۰.۹	۱	۳.۷۵



شکل ۲۰- کنتورهای حداکثر عمق آبشستگی بر حسب متر، براساس مدل های ۱۳ تا ۲۰

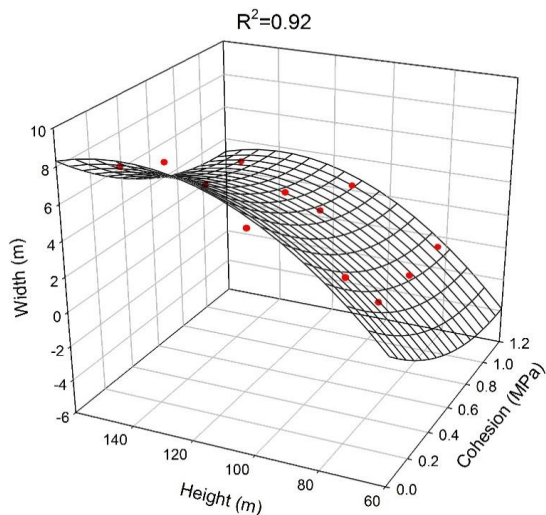


شکل ۱۹- کنتورهای حداکثر عمق آبشستگی بر حسب متر براساس مدل های ۱ تا ۱۲

همانگونه که از شکل ۲۲ بر می‌آید رابطه‌ای تنگاتنگ بین سه پارامتر ارتفاع سد، چسبندگی درزه و عرض منطقه‌ی آبشستگی بحرانی وجود دارد و رابطه‌ی زیر بخوبی می‌تواند این ارتباط را بیان دارد. در این رابطه  $H$  بیانگر ارتفاع سد،  $C$  بیانگر چسبندگی درزه و  $W$  نشان دهنده‌ی عرض آبشستگی منطقه‌ی بحرانی است.

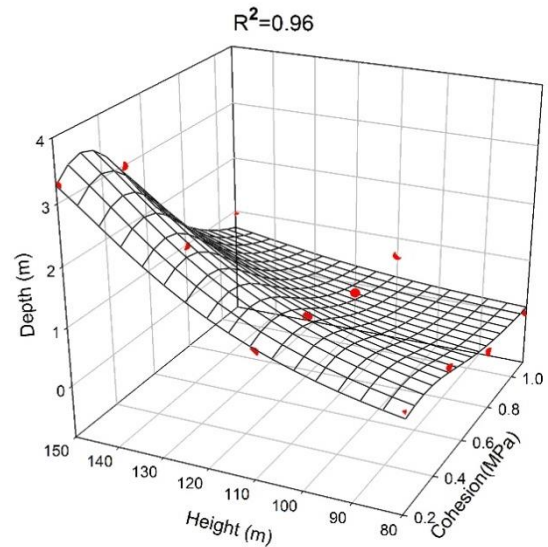
$$W = -14.6042 - 8.6641 \times C + 0.3368 \times H + 3.6852 \times C^2 - 0.0012 \times H^2$$

در شکل ۲۳ این موضوع به نمایش در آمده است، همانطور که ملاحظه می‌شود میزان انطباق  $R^2 = 0.92$  به دست آمده است.



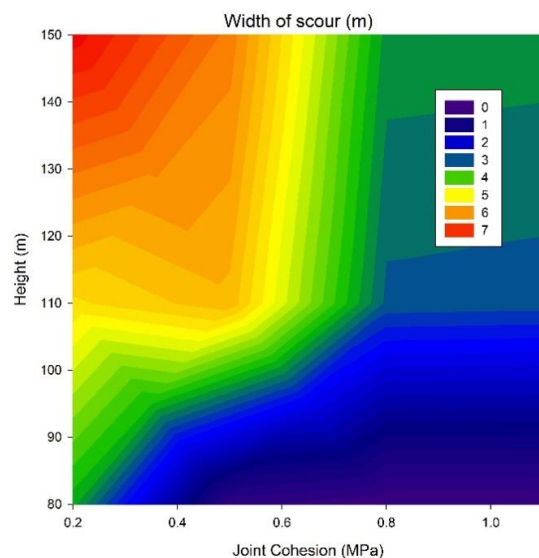
شکل ۲۳- تغییرات هم‌زمان چسبندگی و ارتفاع سرریز با عرض آب شستگی با داده‌های حاصل از مدل‌سازی آبشستگی پی سنگ درزه‌دار

همانگونه که در شکل ۲۴ ملاحظه می‌شود افزایش مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی درزه از مقدار ۲۰ به ۳۰ موجب کاهش چشمگیر مقدار عرض آبشستگی منطقه‌ی بحرانی می‌شود ولیکن، در ورای این مقدار این افزایش محسوس نمی‌باشد. همچنین می‌توان عنوان نمود که تغییرات عرض منطقه‌ی آبشستگی براساس تغییرات زاویه‌ی اصطکاک درزه‌ها تقریباً مستقل از ارتفاع سرریز می‌باشد.

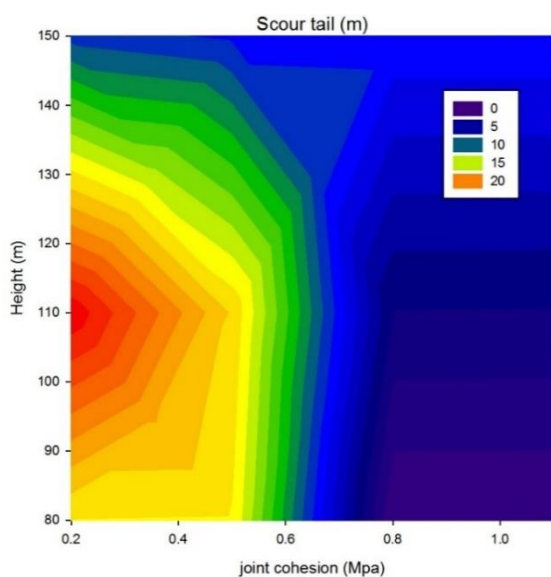


شکل ۲۱- تغییرات هم‌زمان چسبندگی و ارتفاع سرریز با عمق آب شستگی با استفاده داده‌های حاصل از مدل‌سازی آبشستگی پی سنگ درزه‌دار

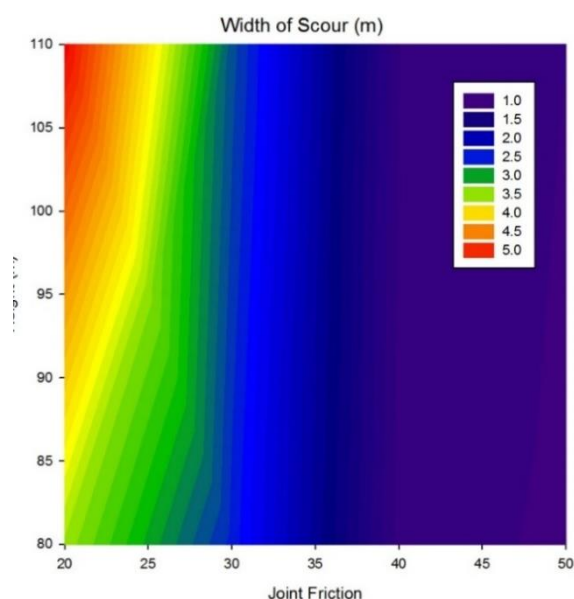
کنتورهای مربوط به عرض آبشستگی بحرانی نسبت به تغییرات ارتفاع، چسبندگی و زاویه اصطکاک در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ مشخص شده‌اند. در شکل ۲۲ تغییرات عرض آبشستگی منطقه‌ی بحرانی براساس مقدار چسبندگی درزه و ارتفاع سرریز بررسی شده است.



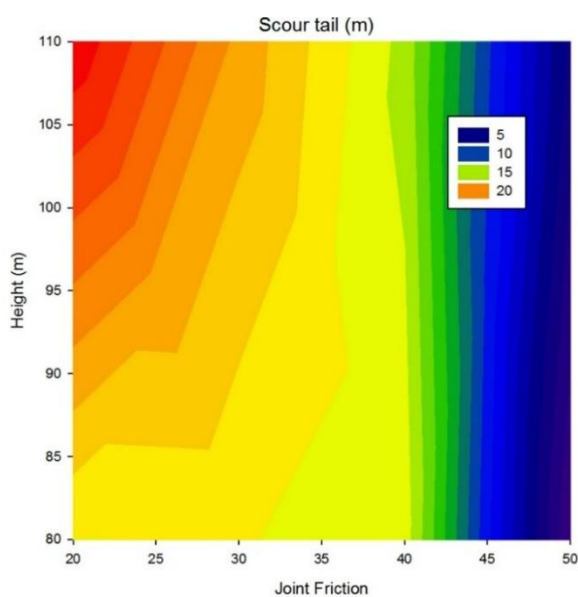
شکل ۲۲- کنتورهای عرض آبشستگی بحرانی بر حسب متر، براساس مدل‌های ۱ تا ۱۲



شکل ۲۵- کنتورهای گستره‌ی آبشستگی بر حسب متر،  
براساس مدل‌های ۱ تا ۱۲



شکل ۲۴- کنتورهای عرض آبشستگی بحرانی بر حسب  
متر، براساس مدل‌های ۱۳ تا ۲۰



شکل ۲۶- کنتورهای گستره‌ی آبشستگی بر حسب متر،  
براساس مدل‌های ۱۳ تا ۲۰

#### ۴- نتیجه گیری

سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان قرار می‌گیرند، الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر داده و به صورت موضعی باعث جابجایی ذرات بستر از مکان اولیه به پایین دست می‌شوند که به این پدیده آبشستگی گفته

در ادامه ی بررسی های انجام گرفته در این تحقیق گستره‌ی منطقه آبشستگی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل‌های زیر این بررسی‌ها به نمایش در آمده‌اند. اشکال ۲۵ و ۲۶ بیان‌کننده تغییرات گستره‌ی آبشستگی براساس چسبندگی درزه و ارتفاع سد است. در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که تغییرات گستره‌ی آبشستگی به شدت تحت تاثیر تغییرات چسبندگی درزه در محدوده‌ی ۰.۲ تا ۰.۶ مگاپاسکال است و در مقادیر بیشتر از این مقدار این تغییرات ناچیز است. نکته دیگر، تقارن تقریبی کنتورها حول محور ارتفاع ۱۱۰ متر است که بیانگر ارتفاع بحرانی برای گستره‌ی آبشستگی است به نحوی که در کمتر و بیشتر از این مقدار گستره‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۲۶ ملاحظه می‌گردد، با کاهش مقدار زاویه اصطکاک درزه، گستره‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان ادعا کرد که تغییرات گستره‌ی آبشستگی براساس زاویه اصطکاک درزه تقریباً مستقل از ارتفاع سد می‌باشد.

- می‌شود. اهمیت بررسی پدیده آبخستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبخستگی قابل ملاحظه باشد به گونه ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه ای برسد و پایداری این سازه ها را در معرض خطر قرار داده و یا موجب تخریب آن‌ها گردد. با توجه به این امر که در بیشتر حالات جنس بستر حوضچه‌ی آرامش سنگی می‌باشد به منظور تخمین ابعاد آبخستگی ضروری است که پارامترهای سنگ بستر در نظر گرفته شود. از آنجا که محیط سنگی محیطی بلوکی و ناپیوسته است بنابراین امکان مدل کردن این محیط در نرم‌افزارهای متعارف مورد استفاده برای تحلیل آبخستگی وجود ندارد. بدین منظور در این تحقیق در ابتدا جریان سیال در نرم‌افزار FLOW-3D شبیه سازی و سپس پارامترهای مورد نیاز از آن استخراج و وارد نرم‌افزار المان مجزای UDEC گردیده است. بدین منظور آنالیز حساسیت بر روی دو پارامتر اساسی در مقاومت درزه های سنگی یعنی چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک درزه‌ها صورت پذیرفته است. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که:
- با افزایش میزان چسبندگی درزه‌های سنگی عمق آبخستگی به شدت کاهش می‌یابد.
- با افزایش زاویه اصطکاک درزه‌ها، عمق آبخستگی کاهش می‌یابد. گرچه این مقدار به نسبت کاهش آبخستگی بر اثر افزایش چسبندگی محسوس نیست و می‌توان از تاثیر این پارامتر در افزایش عمق آبخستگی در مقابل نقش چسبندگی درزه‌ها چشم‌پوشی کرد.
- برای حد بالای چسبندگی درزه های سنگی (۱.۱ مگاپاسکال) در سرریز ۸۰ متری میتوان ادعا نمود که آبخستگی اتفاق نخواهد افتاد. برای حد بالای زاویه اصطکاک درزه‌ها (۵۰ درجه) نمی‌توان برای همان سرریز چنین ادعایی را مطرح کرد.
- همچنین به منظور پیش بینی حداکثر عمق آبخستگی، معادله ای که حاصل از انطباق بر داده های مدل‌سازی است پیشنهاد گردید. بررسی ها نشان داد که پارامترهای مکانیکی درزه‌ها ( $c$  و  $\phi$ ) بر روی عرض آبخستگی منطقه‌ی بحرانی نیز اثرگذار است.
- افزایش مقدار زاویه‌ی اصطکاک درزه‌ها از مقدار ۲۰ به ۳۰ درجه تاثیر زیادی در کاهش عرض منطقه‌ی آبخستگی دارد. در ورای این مقدار تاثیر زاویه اصطکاک بر عرض آبخستگی منطقه‌ی بحرانی بسیار کم است.
- تغییرات عرض آبخستگی بحرانی بر اثر تغییرات زاویه‌ی اصطکاک تقریباً مستقل از ارتفاع سرریز است.
- رابطه‌ی تنگاتنگ بین تغییرات چسبندگی و ارتفاع سرریز و تغییر عرض آبخستگی بحرانی وجود دارد و معادله‌ای جهت پیش بینی عرض آبخستگی بر اساس دو پارامتر چسبندگی و ارتفاع سرریز بیان گردید که حاصل انطباق بر داده های مدل‌سازی است.
- افزایش زاویه‌ی اصطکاک درزه موجب کاهش گستره‌ی آبخستگی شده و بررسیها نشان می‌دهد. این تغییرات تقریباً مستقل از ارتفاع سرریز است.
- تغییرات چسبندگی درزه‌ها در محدوده‌ی ۰.۶ - ۰.۲ مگاپاسکال تاثیر زیادی در گستره‌ی منطقه‌ی آبخستگی دارد به نحوی که با افزایش مقدار چسبندگی از گستره‌ی منطقه‌ی آب شسته شده کم می‌شود.
- افزایش چسبندگی به مقدار بیشتر از ۰.۶ مگاپاسکال تاثیر ملموسی در کاهش گستره‌ی آبخستگی نخواهد داشت.
- ارتفاع بحرانی سرریز برای گستره آبخستگی مقدار ۱۱۰ متر است و مقادیر بیشتر و یا کمتر از این ارتفاع، گستره‌ی آبخستگی کاهش می‌یابد.

## ۵- منابعها

- [1] Bollaert. E, Stratford. C , Lesleighter. E. (December 2014). Numerical modelling of rock scour: Case study of Wivenhoe Dam (Australia). Scour and Erosion: Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, CRC Press.
- [2] Bollaert E, Lesleighter E. (2014). Spillway rock scour experience and analysis-the Australian scene over the past four decades. 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures: The University of Queensland, 1-10.
- [3] Bollaert E. (2010). A Prototype Scaled Rock Scour Prediction Model. USSD Conference, Sacramento, 11-5.
- [4] Beltaos S. (1981). Rajaratnam N. Impinging circular turbulent jets. Journal of the hydraulics division, 100:1313-28.
- [5] Breusers H, Raudkivi A. (1991). Scouring, Hydraulic Structures Design Manual. IAHR, AA Balkema, Rotterdam, 143.
- [6] Najafi, J. (2002). Experimental study of scour dimension in downstream of pipe culverts. MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian)
- [7] Negm A, Saleh O, Abdel-Aal G, Saudia M. (2002). Investigating Scour Characteristics Downstream of Abruptly Enlarged Stilling Basins. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow, 1-4.
- [8] Ghodsian M. (2002). Scour hole geometry downstream of a culvert. Proceedings of the 13th IAHR-APD Congress: World Scientific, 8.
- [9] Dargahi B. (2003). Scour development downstream of a spillway. Journal of hydraulic research, 41, 417-26.
- [10] Ghodsian M, Melville B, Tajkarimi D. (2006). Local Scour Due to Free Overfall Jet. Proceedings of the ICE-Water Management, 159, 253-60.
- [11] Hirt C, Nichols B. (2010). Flow-3D User's Manual. Flow Science.
- [12] Manual UDEC. (2005). Version 4.0, Itasca Consulting Group.
- [13] ZayanAb Consulting Engineering. (2012). study of BeheshtAbad dam site.
- [14] Pemberton EL, Lara JM. (1984). Computing Degradation and Local Scour: Technical Guideline for Bureau of Reclamation: Sedimentation and River Hydraulics Section, Hydrology Branch, Division of Planning Technical Services, Engineering and Research Center.
- [15] Derrick, Freeman. (2004). Stream Investigation, and Restoration, American Society of Civil Engineers.
- [16] Vanoni VA. (2006). Sedimentation engineering. ASCE.



## The Effect of Strength Parameters of Rock Joints on the Scour Intensity of Stilling Basin behind a Dam

Seyed Mosleh Eftekhari<sup>1\*</sup>, Alireza Baghbanan<sup>2</sup>, Anahid Ghamari Mood<sup>2</sup>

1. Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

Received: 2023. February.03; Accepted: 2023.June.01

(\* Corresponding author: Mosleh.eftekhari@modares.ac.ir)

---

### *Keywords*

Scour  
Stilling basin  
Strength Parameters  
Discrete element method

---

### *English Extended Abstract*

#### **Summary**

The analysis of the scour phenomenon is fundamental for a correct stilling basin design. Generally, the stilling basin is constructed behind the dam to reduce the scour depth. In this study the effect of rock mass strength parameters on the still basin behind the dam is analyzed. In this study, two numerical tools have been utilized to simulate the scour in the stilling basin behind the Behashtabad dam. The results indicate the powerful influence of rock mass strength parameters on the shape and form of scouring in Beheshtabad dam.

### **Introduction**

Scour phenomenon is removal of sediment such as sand and rocks around the structure and the particle transport by flow from the primary location to another location. It is an interaction between the hydrodynamics and the geotechnical properties of the substrate. Scour, caused by swiftly moving water, can compromise the integrity of a structure. Generally, the stilling basin is constructed behind the dam to reduce the scour depth. Nevertheless, the final depth of scour erosion must be predicted. In this study the effect of rock mass strength parameters on the still basin behind the dam is analyzed.

### **Methodology and Approaches**

Numerical modeling is one of the appropriate methods in analyzing the scour phenomenon. The conventional softwares do not have any ability to model the scour in the rock mass. Therefore, in this study, two numerical tools have been utilized to simulate the scour in the stilling basin behind the Behashtabad dam. In the first step, FLOW-3D software was used to perform flow pressure in spillway. Then the appropriate output of this software was extracted and the rest of analyses were performed in Universal Distinct Element Code (UDEC).

### **Results and Conclusions**

The results indicate the powerful influence of rock mass strength parameters on the shape and form of scouring in Beheshtabad dam. Increasing the amount of cohesion and friction angle of the joints reduce the width and depth of critical scour and its extent in different models with variable fracture patterns. Then equations have been proposed to predict the depth and width of the scour.

---