

# اثر هیدرومکانیکی توده سنگ پی بر پایداری سدهای بتنی وزنی

رضا مهین روستا (استادیار)

دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

محمی الدین حمیدی پور (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

یکی از عوامل مهم و مؤثر در رفتار توده سنگ‌های تکیه‌گاهی در سدها، مشخصات هندسی و هیدرومکانیکی درزه‌هاست که نادیده‌گرفتن آن‌ها در طراحی سدهای وزنی ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری به وجود آورد یا منجر به طرحی غیراقتصادی شود. در این تحقیق با استفاده از یک روش اجزاء مجزا، پایداری یک سد بتنی وزنی مستقر بر توده سنگی با دو و سه دسته درزه مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ارزیابی کلیه ی لوازم طراحی — از جمله محاسبه فشار بالا برنده، کنترل واژگونی، کنترل لغزش، کنترل وقوع ترک کششی و ظرفیت باربری پی سنگی با لحاظ کردن اثر زاویه دسته درزه‌ها نسبت به هم و شیب آن‌ها نسبت به افق انجام شده — را شامل می‌شود. نتایج حاصله نشان می‌دهد که ویژگی‌های هیدرومکانیکی توده سنگ تکیه‌گاه بر توزیع فشار بالا برنده زیر سد تأثیر زیادی دارد، که خود سهم عمده‌ی در ضریب اطمینان پایداری سد دارد. بدین ترتیب بهتر است فرضیات مورد استفاده برای طراحی پی سدهای وزنی در محیط‌های پیوسته در توده سنگ‌های تکیه‌گاهی که شامل محیط‌های ناپیوسته‌اند، با احتیاط بیشتر استفاده شوند.

reza.mahinroosta@gmail.com  
m.hamidipour@yahoo.com

واژگان کلیدی: سد وزنی، توده سنگ درزه‌دار، روش اجزاء مجزا، تحلیل پایداری.

## ۱. مقدمه

پیش‌ترین محققین مطالعاتی در خصوص پی سنگی سدهای وزنی انجام داده‌اند. در یکی از این مطالعات، با استفاده از تحلیل تغییرشکل ناپیوسته (DDA)<sup>۱</sup> و با یک الگوریتم هیدرومکانیکی، تأثیر ناپیوستگی‌های سنگ بر نیروی بالا برنده و تراوش در پی یک سد بتنی وزنی مورد بررسی قرار گرفت.<sup>۲</sup> در آن تحقیق، اهمیت چندین پارامتر مؤثر بر پایداری سد — نظیر جهت، فاصله و محل ناپیوستگی‌ها — از طریق «تحلیل حساسیت» ارزیابی شد و تأثیر زهکشی بر کاهش فشار بالا برنده و افزایش پایداری سد نیز بررسی شد. نتایج حاصله نشان داد که برای سدهای بتنی وزنی احداث شده بر توده سنگ‌های درزه‌دار، که در آن‌ها عملاً ناپیوستگی‌ها کنترل‌کننده‌ی جریان در پی هستند، فرض توزیع خطی یا دوخطی برای فشار بالا برنده اصلاً مناسب نیست و معمولاً فشار بالا برنده‌ی محاسبه شده به روش اجزاء مجزا از توزیع فشار خطی بیشتر است. همچنین زهکشی‌ها با توجه به محل و قطرشان می‌توانند در کاهش نیروی بالا برنده بسیار مؤثر باشند.

در تحقیقی دیگر، وضعیت پایداری یک سد وزنی بتنی ساخته شده در ایتالیا به ارتفاع ۷۳ متر که بر یک توده سنگ گرانیتی درزه‌دار بنا شده بود، بررسی شد.<sup>۳</sup> بدین منظور، با استفاده از روش اجزاء مجزا و برنامه‌ی UDEC، توده سنگ پی در شرایط دو بعدی و به صورت یک محیط ناپیوسته مدل شد و مورد تحلیل ترکیبی تنش-جریان قرار گرفت. این مدل شامل مقطعی از سد و تکیه‌گاه به طول ۱۵۰ متر در بالادست و پایین دست سد و به عمق ۱۹۰ متر بود و از دو الگوی درزه‌ی منظم

در طراحی و ارزیابی پایداری سدهای وزنی بر روی توده سنگ‌های درزه‌دار باید به عوامل مختلفی توجه داشت. سدهای وزنی ممکن است به دلیل لغزش روی یک صفحه‌ی افقی یا نزدیک به افق، واژگونی حول پنجه یا افزایش تنش وارده نسبت به تنش مجاز، دچار خرابی شوند. این خرابی ممکن است درون سازه، در پایه‌ی سد، یا در پی اتفاق بیفتد.<sup>۴</sup> در این میان پی، به دلیل ناشناخته بودن رفتار و کم‌رنگ تر بودن نقش آن در طراحی سدهای وزنی می‌تواند خطرناک‌تر باشد. در غالب موارد، پی سدهای وزنی از توده سنگ‌هایی تشکیل می‌شود که ناپیوستگی‌ها جزء ذاتی آن‌هاست. وجود ناپیوستگی‌ها در توده سنگ و تأثیرات مهم خصوصیات آن‌ها همچون میزان بازشدگی، زبری، سختی، شیب، فاصله‌داری و موقعیت هندسی درزه‌ها نسبت به بدنه‌ی سد باعث پیچیده شدن شناخت رفتار توده سنگ می‌شود. علاوه بر آن، اندرکنش رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ درزه‌دار، رفتاری پیچیده‌تر از توده سنگ یک پارچه به وجود می‌آورد. در مورد سدهای وزنی، با توجه به این که نیروی بالا برنده نیز در واژگونی و لغزش سد نقش مهمی دارد، محاسبه‌ی دقیق‌تر آن — که تا حد زیادی وابسته به مشخصات توده سنگ پی سازه است — می‌تواند به طرحی ایمن‌تر و اقتصادی‌تر بینجامد. با توجه به مطالب گفته شده، مطالعه‌ی دقیق‌تر توده سنگ‌پی سدهای وزنی امری ضروری به نظر می‌رسد.

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۷/۲۵، اصلاحیه ۱۳۸۹/۲/۵، پذیرش ۱۳۸۹/۵/۱۸

در تمامی موارد یادشده، از روش اجزاء مجزا برای بررسی دقیق رفتار هیدرومکانیکی یک سد با دسته درزه‌های خاص استفاده شده است. در این نوشتار سعی شده تا با توجه به تأثیرات رفتار هیدرومکانیکی سد و تکیه‌گاه آن، تفاوت‌های روش اجزاء مجزا و روش‌های مرسوم تحلیل و طراحی در یک نمونه سد بتنی متعارف بررسی، و کم‌ترین و بیشترین تفاوت‌ها مشخص شود. برای این منظور، اهمیت مشخصات هندسی توده سنگ درزه‌دار بر فشار برخاستی زیر سد، ایجاد ترک در اتصال سد و تکیه‌گاه، پایداری سد در برابر لغزش و واژگونگی، با استفاده از نرم‌افزار UDEC مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد دسته درزه‌ها، شیب و مشخصات آن‌ها، فاصله‌ی آن‌ها و نیز بازشدگی اولیه درزه‌ها، پارامترهای هندسی هستند که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

## ۲. شبیه‌سازی رفتار هیدرومکانیکی

رفتار هیدرومکانیکی در توده سنگ درزه‌دار مستلزم رابطه‌ی تکراری میان تغییر شکل درزه‌ها و تنش مؤثر است که باعث تغییر در بازشدگی درزه‌ها و میزان نفوذپذیری خواهد شد. به همین دلیل در بیشتر سنگ‌هایی که نفوذپذیری کمی دارند، رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ بر واکنش‌های محیط بسیار مؤثر است. روش اجزاء مجزای UDEC قابلیت شبیه‌سازی جریان سیال از میان درزه‌های یک سیستم نفوذپذیر را دارد.<sup>[۸]</sup> تحلیل هیدرومکانیکی کامل در آن به‌گونه‌ی انجام می‌شود که نفوذپذیری درزه‌ها بستگی به تغییر شکل مکانیکی درزه‌ها داشته و به عکس، فشار آب درزه بر رفتار مکانیکی آن مؤثر است.

در این برنامه برای نمایش دوبعدی ناپوستگی بین بلوک‌های سنگی از روشی خاص استفاده می‌شود. ناپوستگی‌ها در واقع شبکه‌ی از حفره‌های به هم پیوسته و کانال‌ها هستند که توسط نقاط تماس از یکدیگر جدا می‌شوند؛ این نقاط بیانگر نیروهای ناشی از اندرکنش مکانیکی بلوک‌های سنگی‌اند. نقاط تماس ممکن است در محل نقاط شبکه بلوک‌ها یا در امتداد لبه‌ها و در نقاط دیگر باشند. در غیاب نیروی جاذبه، فرض بر آن است که فشار سیال به‌طور یکنواخت پخش می‌شود و در مسائلی که نیروی جاذبه وجود دارد، فرض می‌شود که فشار هیدروستاتیکی حاکم است؛ به عبارتی فشار سیال مربوط به هر درزه در راستای جاذبه به صورت خطی تغییر می‌کند و فشار وسط آن برای درزه لحاظ می‌شود. جریان به‌علت تفاوت فشار سیال در دو انتهای درزه‌های مجاور ایجاد می‌شود و نرخ جریان بسته به نوع تماس به دو طریق محاسبه می‌شود. برای یک نقطه‌ی تماس نرخ جریان توسط رابطه‌ی ۱ ارائه می‌شود:

$$q = -k_c \Delta p \quad (1)$$

که در آن  $k_c$  پارامتر نفوذپذیری نقطه‌ی تماس، و  $\Delta p$  اختلاف فشار آب است که براساس رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \quad (2)$$

$\rho_w$  چگالی سیال، و  $g$  شتاب ثقل است که فرض می‌شود در خلاف جهت  $y$  عمل می‌کند. همچنین  $y_1$  و  $y_2$  عدد ارتفاع در مرکز درزه‌ها هستند. در موارد تماس لبه به لبه، یک طول تماس می‌تواند تعریف شود. در این مورد می‌توان از قانون مکعب درمورد جریان در ترک‌های دوبعدی بهره جست. در این

و تصادفی برای پی تبعیت می‌کرد. در آن مطالعه، تأثیر پرده‌ی تزریق و زهکش بر وضعیت تراوش در پی نیز بررسی شد. از نتایج تحلیل یادشده می‌توان به تأثیر قابل ملاحظه‌ی آرایش درزه سنگ بر رفتار پی سد، تأثیر زیاد پرده‌ی تزریق و زهکش در کاهش دبی خروجی، کاهش فشار بالا برنده و در نتیجه افزایش پایداری در برابر لغزش در سد اشاره کرد. نتایج حاصله برای دسته درزه‌های با توزیع منظم و تصادفی نشان داد که در مقطع سد مورد نظر، توزیع فشار بالا برنده و تقریباً مشابه رهنمون‌های ارائه شده در استانداردهای سدسازی است. همچنین سد مورد نظر در برابر لغزش پایدار بوده ولی ضریب اطمینان لغزش به روش اجزاء مجزا کم‌تر از روش‌های مرسوم است. این نکته حاصل مدل‌سازی دقیق‌تر توده سنگ توسط برنامه‌ی اجزاء مجزا بوده است.

در یکی دیگر از مطالعات انجام شده، وضعیت نفوذ و پایداری یک سد از نوع مصالح بنایی به قدمت ۱۰۰ سال و مستقر بر سنگ بستر درزه‌دار، به وسیله‌ی برنامه‌ی UDEC بررسی شد.<sup>[۹]</sup> مدل مورد استفاده در سنگ و درزه‌ها مدل موهر - کولمب بود؛ همچنین برای ارزیابی ایمنی سازه و تهیه‌ی طراحی برای بازسازی سد، مراحل اصلی ساخت سد به صورت مسئله‌ی متقابل هیدرومکانیکی و ترمومکانیکی یک محیط ناپوسته شبیه‌سازی شد. در آن تحقیق با تعیین حالت‌های احتمالی شکست، طراحی برای بازسازی سد ارائه شد و سپس شبیه‌سازی روش پیشنهادی به افزایش قابل ملاحظه‌ی ضریب ایمنی سد منجر شد. محققین با مدل‌سازی سد مورد نظر به این نتیجه رسیدند که به دلیل نفوذپذیری زیاد قسمت بتنی اتصال سد فوق به توده سنگ تکیه‌گاهی، عملاً لغزش در پی سد را به همراه خواهد داشت، و انجام تمهیداتی برای بهبود وضعیت سد ضروری است. ایشان در یک تحلیل حساسیت نشان داد که چنانچه ناحیه‌ی فوق نفوذناپذیر فرض شود عملاً احتمال لغزش و ناپایداری وجود ندارد؛ این مسئله نشان‌گر اهمیت مدل‌سازی دقیق توده سنگ درزه‌دار با استفاده از روش اجزاء مجزاست.

رفتار سد بتنی وزنی Albigna در سویس، به ارتفاع ۸۰ متر نیز مورد بررسی پژوهش‌گران قرار گرفت.<sup>[۱۰]</sup> آنان با استفاده از مشاهدات حاصل از ابزار نصب شده در بدنه و پی سد، و نیز با استفاده از تحلیل اجزاء مجزای سد مذکور و تأیید آن با نتایج ابزار، احتمال گسترش ترک، لغزش و توزیع فشار آب را با روش‌های مرسوم مقایسه، و مشاهده کردند که در سد مورد بررسی، فشار بالا برنده بعد از گسترش ترک -- با توجه به روش‌های مرسوم -- بسیار محافظه‌کارانه است و با مشاهدات صورت گرفته هم‌خوانی ندارد. همچنین دریافتند که چنانچه فاصله‌ی درزه‌ها بسیار کم باشد و جهت درزه‌های نسبتاً تراکم‌پذیر<sup>۲</sup> عمود بر امتداد رودخانه باشد، بعد از آبرگیری بازشدگی درزه‌ها به شدت تغییر خواهد کرد. در این شرایط محاسبات دستی و مدل‌های عددی در محیط پیوسته جواب مناسب نخواهند داد و لازم است از روش اجزاء مجزا در ارزیابی پایداری سد استفاده کرد.

و بالاخره، پاسخ تکیه‌گاه سد قوسی بتنی تحت اثرات متقابل رفتار هیدرولیکی و مکانیکی و با استفاده از روش اجزاء مجزای دو بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت.<sup>[۱۱]</sup> پژوهش‌گران در تحقیق خود تأثیرات فشار آب پشت سد، پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و مکانیکی درزه‌ها و پرده‌ی آب‌بند را بر ایمنی تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی بررسی کردند. همچنین مقادیر لغزش و بازشدگی در محل ناپوستگی‌ها و میزان نشست آب از داخل آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و از میزان گسترش آن‌ها در کل تکیه‌گاه به‌عنوان شاخصی برای تخمین ایمنی تکیه‌گاه سد استفاده شد. نتایج حاصله نشان‌گر تأثیر درزه‌ها و خصوصیات مکانیکی، هیدرولیکی و هندسی آن‌ها بر ایمنی و میزان نشست تکیه‌گاه است.

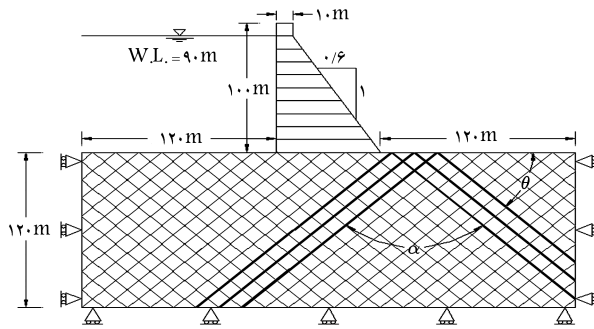
حالت دبی جریان عبارت است از:

$$q = -k_j a^2 \frac{\Delta p}{l} \quad (3)$$

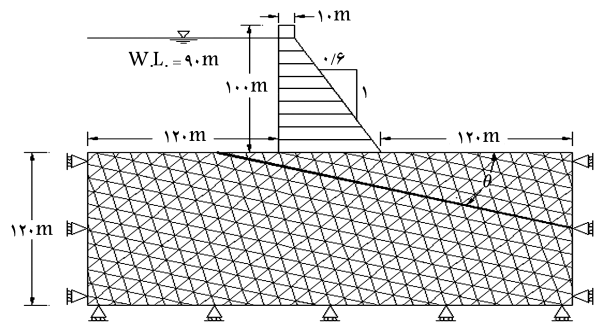
که در آن  $k_j$  ضریب نفوذپذیری درزه، و مقدار آن برابر با  $1/(12\mu)$  است؛  $\mu$  گرانروی دینامیکی سیال برحسب پاسکال ثانیه،  $a$  بازشدگی هیدرولیکی در نقطه‌ی تماس، و  $l$  طول تعریف شده برای نقطه‌ی تماس در یک درزه است. به طور کلی بازشدگی هیدرولیکی در طول اجرای برنامه از رابطه‌ی ۴ به‌روز می‌شود:

$$a = a_0 + u_n \quad (4)$$

$a_0$  بازشدگی درزه (نقطه‌ی تماس) در تنش صفر، و  $u_n$  تغییر مکان قائم درزه است (بازشدگی مثبت فرض می‌شود). برای بازشدگی یک مقدار کمینه ( $a_{res}$ )، فرض می‌شود که بسته شدن مکانیکی تماس به مقدار کم‌تر از آن تأثیری بر نفوذپذیری تماس نخواهد داشت. مطالب فوق بیان‌گر رابطه‌ی ساده بین بازشدگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌هاست.

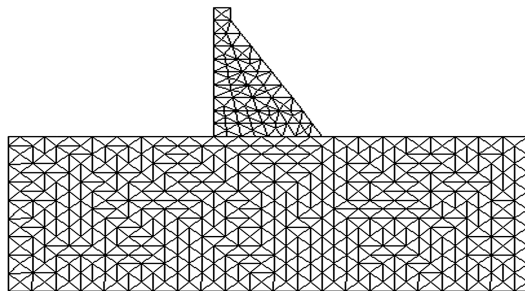


الف) پی با دو دسته درزه با زاویه‌ی بین  $\alpha$



ب) پی با سه دسته درزه با زاویه‌ی بین ۶۰ درجه.

شکل ۱. هندسه‌ی کلی و شرایط مرزی مدل.



شکل ۲. نمونه‌ی از شبکه‌ی المان‌های مدل.

### ۳. هندسه‌ی مدل و مشخصات مصالح

مدل مورد بررسی شامل یک سد بتنی وزنی به ارتفاع  $10^\circ$  مترو مقطعی از توده سنگ به طول  $120$  متر در پایین دست و بالادست، و نیز به عمق  $120$  متر است. عرض تاج سد  $10$  متر، و پایین دست سد با شیب  $0.6$  به  $1$  در نظر گرفته شده است. بدنه‌ی بتنی سد شامل  $10$  بلوک به ارتفاع  $10$  متر است که هر بلوک نشان دهنده‌ی مرحله‌ی از ساخت سد است. تراز آب بالادست سد  $90$  متر و تراز آب پایین دست صفر در نظر گرفته شده است. تمامی مرزهای کناری مدل نفوذناپذیر بوده و هیچ‌گونه آبی از دو طرف توده سنگ، یا از پایین آن به بیرون منتقل نمی‌شود. از جابه‌جایی افقی در امتداد مرزهای قائم و از جابه‌جایی قائم در امتداد مرز پایینی مانع به عمل آمده است. در شکل ۱ هندسه‌ی کلی و شرایط مرزی مدل، و در شکل ۲ نمونه‌ی از شبکه‌ی المان‌های آن نشان داده شده است.

در واقعیت تعیین شیب، جهت درزه‌ها و خواص هیدرومکانیکی آن‌ها دارای قطعیت نبوده و میزان دقت در برآورد آن‌ها بستگی به میزان اکتشافات ژئوتکنیکی در تکیه‌گاه‌ها و پی سد دارد. با این وجود، در این مقاله جهت ساده‌سازی و مشاهده اثرات ناپوستگی‌ها بر رفتار هیدرومکانیکی سد و تکیه‌گاه آن، دسته‌درزه‌ها کاملاً یکسان فرض شده‌اند؛ بدین ترتیب، توده سنگ تکیه‌گاه با دو سه دسته درزه مدل شده است. در حالت اول، دو دسته درزه در سه وضعیت جداگانه نسبت به هم دارای زاویه‌های  $30^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه‌اند (زاویه‌ی  $\alpha$  در شکل ۱ الف). در حالت دوم سه دسته درزه نسبت به هم دارای زاویه‌ی  $60^\circ$  درجه‌اند. در تمام حالات دسته‌درزه‌ی اول از زاویه‌ی صفر تا  $180^\circ$  درجه و با فواصل  $15$  درجه نسبت به افق تغییر می‌کند (زاویه‌ی  $\theta$  در شکل ۱ ب) تا تأثیر شیب دسته‌درزه‌ها در پایداری سد بررسی شود. فاصله‌ی درزه‌های پی در هر جهت برابر  $S = 10$  m لحاظ شده است.

در ابتدا برای مدل مفروض مراحل ساخت و آبیگری به طور کامل تحلیل شد و پس از آن بررسی پایداری انجام شد. تحلیل اولیه‌ی ساخت و آبیگری در سه مرحله انجام شد. در مرحله‌ی اول توده سنگ پی تحت تنش‌های اولیه به تعادل رسید؛ سپس در مرحله‌ی دوم، ساخت بدنه‌ی بتنی سد در ده گام تحلیل شد و در هر گام مدل به تعادل کامل رسید. در مرحله‌ی آخر مجموعه‌ی سد و تکیه‌گاه به همراه  $90$  متر آب مخزن بالادست تحت تحلیل هیدرومکانیکی قرار گرفت.

تمامی مصالح و درزه‌ها از مدل رفتاری موهر-کولمب پیروی می‌کنند. مشخصه‌های ژئوتکنیکی مصالح سد بتنی و سنگ سالم پی در جدول ۱ و مشخصه‌های مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها در جدول ۲ آمده است. ضریب نفوذپذیری درزه‌ها، با فرض گرانروی دینامیکی آب معادل  $\mu = 10^{-2} Pa \cdot s$ ،  $K_j = 1712 \mu = 8373 Pa^{-1} \cdot s^{-1}$ ، در نظر گرفته شد. مقدار سختی قائم و برشی درزه‌های پی با فرض مدول کشسانی توده سنگ برابر با  $8 GPa$  با استفاده از روابط ۵ و ۶ به دست آمده است. [۵]

$$\frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{K_n \cdot S} \Rightarrow K_n = 172 \frac{GPa}{m} \quad (5)$$

$$K_s \cong \frac{1}{3} K_n = 57.3 \frac{GPa}{m} \quad (6)$$

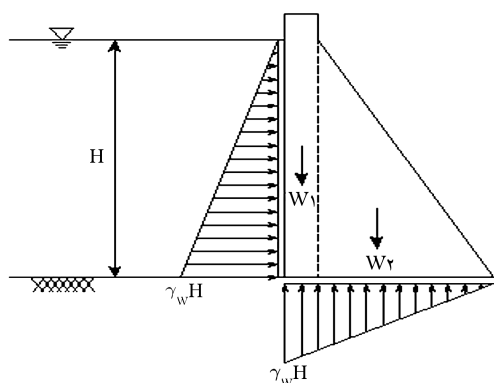
که در آن‌ها  $E_m$ ،  $E_r$ ،  $K_s$ ،  $K_n$  و  $S$  به ترتیب مدول کشسانی توده سنگ، مدول کشسانی سنگ سالم، سختی برشی درزه‌ها، سختی قائم درزه‌ها و فاصله‌ی درزه‌ها از یکدیگر است. برای درزه‌ی بین بتن و سنگ، سختی قائم و برشی  $1/5$  برابر مقادیر بالا در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات لحاظ شده برای مصالح مدل.

نوع مصالح	مدول کشسانی E (Gpa)	ضریب پواسون ν	مدول برشی G (Gpa)	مدول حجمی K (Gpa)	چسبندگی c (Mpa)	زاویه اصطکاک φ	دانسیته γ (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت کششی σ <sub>t</sub> (Mpa)
بتن	۲۵	۰٫۲	۱۰٫۴۲	۱۳٫۸۹	۵٫۵	۴۵°	۲۴۰۰	۲٫۵
سنگ پی	۲۵	۰٫۲۵	۱۰	۱۶٫۶۷	۴	۴۵°	۲۳۰۰	۱٫۵

جدول ۲. مشخصات لحاظ شده برای درزه ها.

نوع مصالح	چسبندگی c (Mpa)	زاویه اصطکاک φ	سختی قائم K <sub>n</sub> (Gpa/m)	سختی برشی K <sub>s</sub> (Gpa/m)	مقاومت کششی σ <sub>t</sub> (Mpa)	بازشدگی اولیه α <sub>zero</sub> (m)	بازشدگی باقیمانده α <sub>res</sub> (m)
درزه بین بلوک های سنگ	۰٫۱	۲۵°	۱٫۲	۰٫۴	۰٫۰۵	۱*۱۰ <sup>-۲</sup>	۵*۱۰ <sup>-۵</sup>
درزه بین سنگ و بتن	۰٫۵	۳۵°	۱٫۸	۰٫۶	۰٫۲	۲*۱۰ <sup>-۵</sup>	۱*۱۰ <sup>-۵</sup>



شکل ۳. نیروهای وارد بر سد و وزن برای بررسی پایداری واژگونی.

#### ۴. نتایج تحلیل های انجام شده

با توجه به هندسه مدل و شیب دسته درزه ها، نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده در قالب پایداری در برابر واژگونی سد، لغزش بین سد و تکیه گاه و پایداری پی ارائه می شود.

#### ۱.۴. اثر شیب درزه ها بر پایداری واژگونی سد

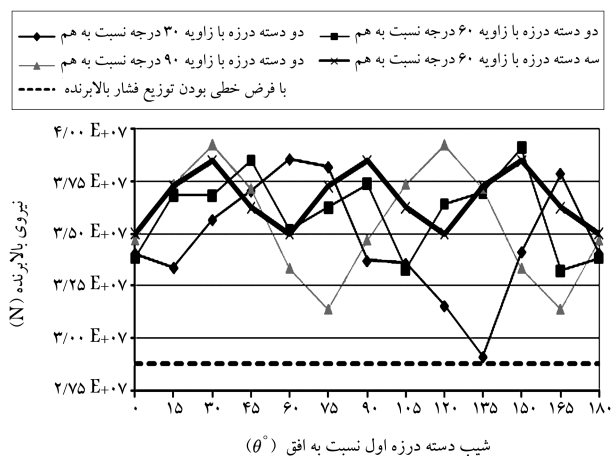
ضریب اطمینان پایداری در برابر واژگونی سد وزنی با لحاظ کردن لنگر نیروی هیدروستاتیکی آب مخزن، وزن سد و نیروی بالابرنده حول پنجه سد بررسی می شود. شکل ۳ نیروهای فوق را برای یک مدل ساده، بدون در نظر گرفتن اثر دسته درزه ها نشان می دهد. در این شکل، توزیع فشار بالابرنده به صورت خطی در نظر گرفته شده که از فشار آب بالادست در پاشنه شروع شده، و به مقدار صفر در پنجه رسیده است. باید توجه داشت که در حالت واقعی، توزیع فشار آب زیر سد به صورت خطی نیست و به تعداد و شیب دسته درزه ها بستگی دارد. این تقریب خطی به این دلیل است که توده سنگ درزه دار یک محیط پیوسته فرض شده که با وجود ناپیوستگی ها و ویژگی های زمین شناسی پی سنگی، همواره فرض قابل قبولی نیست. ضریب اطمینان واژگونی سد از تقسیم گشتاور مقاوم ( $\sum M_R$ ) برگشتاور محرک ( $\sum M_o$ ) محاسبه می شود:

$$\text{ضریب اطمینان واژگونی} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} \quad (7)$$

در شکل ۳ با فرض  $H=90$  m، ضریب اطمینان واژگونی برابر با ۱٫۴۴ به دست می آید.

از آنجا که توزیع فشار آب در توده سنگ درزه دار براساس خواص درزه ها، شیب آن ها، فاصله درزه ها از هم و محل آن ها تغییر می کند، فشار بالابرنده نیز از این عوامل تأثیر می پذیرد، و بنابراین ضریب اطمینان واژگونی در حالات مختلف درزه متأثر از آن خواهد بود. برای محاسبه نیروی بالابرنده در سد، تحلیل های هیدرومکانیکی با توجه به هندسه و پارامترهای معرفی شده انجام شد.

در شکل ۴ مقدار نیروی بالابرنده، پس از انجام تحلیل برای پی با دو و سه دسته درزه و با شیب های مختلف نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود، مقدار



شکل ۴. تأثیر شیب درزه ها بر نیروی بالابرنده.

نیروی بالابرنده با فرض توزیع خطی فشار آب در زیر پی نیز به صورت خط چین نمایش داده شده است. در تمامی موارد، مقدار نیروی بالابرنده به روش اجزاء مجزا از روش معمول بیشتر است. با توجه به مقدار نیروهای بالابرنده و نیز با توجه به رابطه ی ۷، مقدار ضریب اطمینان در برابر واژگونی در مقطع سد محاسبه شد که تغییرات آن برای دسته درزه های مختلف در شکل ۵ مشاهده می شود. چنان که

واژگونی کم‌ترین و بیشترین مقدار را دارد، در مقایسه با توزیع فشار بالا برنده خطی آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در بیشتر موارد مقدار فشار بالا برنده از توزیع فشار خطی که معمولاً فرض می‌شود، بیشتر است. این موضوع در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود؛ براین اساس، تنها در حالتی که دو دسته درزه با شیب‌های ۱۳۵ درجه و ۱۶۵ درجه در پی قرار دارند مقدار فشار بالا برنده تقریباً مساوی با مقدار حالت توزیع خطی است. این موضوع نشان‌گر اهمیت بررسی اثرات هیدرومکانیکی درزه‌ها در برآورد پایداری سدهای بتنی است. بنابراین، به منظور تخمین مناسب فشار بالا برنده در طراحی سدهای بتنی وزنی لازم است توده سنگ تکیه‌گاه با توجه به شیب و زاویه دسته درزه‌ها و ویژگی‌های درزه‌ها مدل‌سازی شود. در غیر این صورت با احتمال برآورد کم‌تر فشار بالا برنده به دلیل فرض توزیع خطی مواجه هستیم، که ممکن است به طرحی غیرایمن منجر شود.

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که برای دو دسته درزه با شیب‌های ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق، از پاشنه‌ی سد تا حدود ۲۰ متر، زیر فشاری در حدود فشار بالادست، و معادل  $10^5 \times 9$  پاسکال، به سد اعمال می‌شود. این موضوع بیان‌گر ایجاد ترک کششی در پاشنه‌ی سد و پیش‌روی آن تا حدود ۲۰ متر است. نتایج تحلیل همچنین نشان‌گر ایجاد ترک کششی است برای زمانی که دو دسته درزه با شیب‌های ۷۵ و ۱۰۵ درجه قرار دارند؛ البته در این مورد طول ترک در حدود ۱۰ متر است. همچنین زمانی که شیب دسته درزه‌ی اول نسبت به افق ۱۵ درجه است جدا از زاویه‌ی بین دسته درزه‌ها، احتمال وقوع ترک کششی وجود دارد. این موضوع از منحنی تنش مؤثر در زیر سد قابل برداشت است. در موارد اخیر مشاهده می‌شود که تقریباً در ۱۰ متر ابتدایی طول پایه‌ی سد، مقدار تنش مؤثر قائم نزدیک به صفر است و این نشانه‌ی برای آغاز ترک کششی در مرز مشترک سد و پی است.

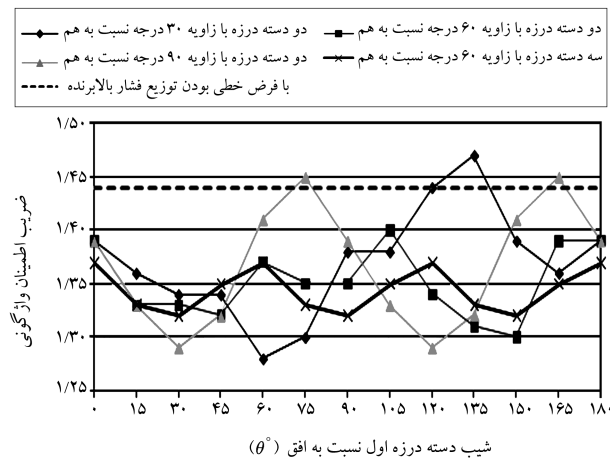
برای مدل ساده‌ی شکل ۳ که در آن فشار بالا برنده به صورت خطی معرفی شده نیز می‌توان با مقایسه‌ی برآیند تنش فشاری ناشی از نیروهای ناشی از وزن سد، لنگر خروج از مرکزیت و مقاومت کششی بین بتن و سنگ احتمال وقوع ترک کششی را بررسی کرد. بررسی فوق نشان داد که در حالت اخیر ضریب اطمینان برابر با ۱/۹۵ در مقابل وقوع ترک کششی وجود دارد. کم‌ترین ضریب اطمینان پیشنهاد شده در برابر وقوع کشش برای بارگذاری عادی حدود ۳ است.<sup>[۱۰]</sup> بدین ترتیب ضریب اطمینان مقطع سد معرفی شده کافی نیست و وجود احتمال وقوع ترک کششی مؤید نتایج حاصل از تحلیل‌های فوق است.

#### ۲.۴. اثر شیب درزه‌ها بر پایداری لغزشی سد

چنان که مشاهده شد نحوه‌ی توزیع دسته درزه‌ها بر توزیع فشار بالا برنده مؤثر است؛ همچنین میزان فشار بالا برنده بر ضریب اطمینان در برابر لغزش مؤثر است زیرا موجب تغییر مقاومت برشی سطح تماس می‌شود. بدین ترتیب در این قسمت، اثر هندسه‌ی دسته درزه‌ها بر ضریب اطمینان در برابر لغزش سد بر روی محل اتصال آن با پی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳، با در نظر گرفتن مقاومت برشی در پایه‌ی سد -- به عنوان تنها عامل بازدارنده در مقابل لغزش -- می‌توان ضریب اطمینان لغزش را از رابطه‌ی ۸ به دست آورد:

$$\text{ضریب اطمینان لغزش} = \frac{\tau A}{\sum F_h} = \frac{(c + \sigma' \tan \varphi) A}{\sum F_h} \quad (8)$$

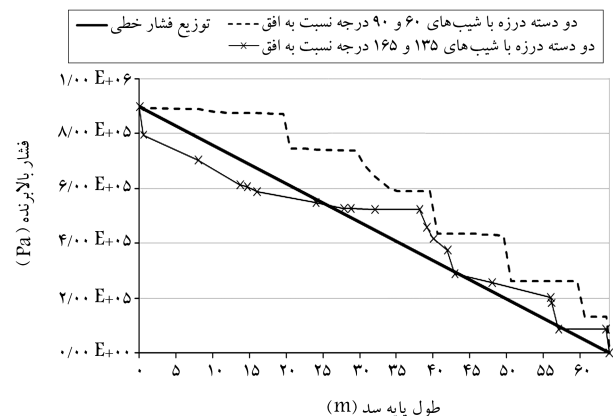
که در آن  $c$  چسبندگی، و  $\varphi$  زاویه‌ی اصطکاک درزه‌ی بین بتن و سنگ است. با در نظر گرفتن نیروهای نشان داده شده در شکل ۳، مقدار ضریب اطمینان در برابر لغزش ۱/۷ خواهد بود. چنانچه در رابطه‌ی ۸ از نیروهای بالا برنده‌ی محاسبه شده در



شکل ۵. تأثیر شیب درزه‌ها بر ضریب اطمینان واژگونی.

مشاهده می‌شود فقط در چهار وضعیت خاص، مقدار ضریب اطمینان محاسبه شده از مقدار محاسبه شده به روش مرسوم (۱/۴۴) بیشتر شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که در زمانی که زاویه‌ی بین دو دسته درزه ۳۰ درجه و ۹۰ درجه است، دامنه‌ی تغییرات ضریب اطمینان واژگونی بیشتر است. هر دو مقدار کمینه و بیشینه ضریب اطمینان مربوط به حالتی است که دو دسته درزه با زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند؛ همچنین زمانی که دو دسته درزه با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند و نیز برای سه دسته درزه با زاویه‌ی ۶۰ درجه بین درزه‌ها، ضریب اطمینان واژگونی در بازه کوچک‌تری نسبت به دو حالت دیگر تغییر می‌کند و مقدار آن بین ۱/۳ تا ۱/۴ است (در سه دسته درزه عملاً محیط به وضعیت نسبتاً همسان<sup>۳</sup> نزدیک می‌شود). بنابراین در این دو حالت شیب دسته درزه‌ی اول نسبت به افق تأثیر کم‌تری در توزیع فشار بالا برنده و در نتیجه پایداری واژگونی سد خواهد داشت. یادآور می‌شود که نتایج بیان شده برای دسته درزه‌های یکنواخت ارائه شده در این نوشتار صادق است و روند آن‌ها می‌تواند در الگوهای مشابه تکرار شود. برای سدهای بتنی خاص بر روی توده سنگ‌های درزه دار، عملاً باید گام‌های فوق تکرار شوند و آنچه در این قسمت ارائه شده فقط به عنوان الگوی عمومی مطرح است؛ به ویژه آنکه در تحلیل‌های حاضر، فاصله‌ی درزه‌ها ۱۰ متر فرض شده که در عمل می‌تواند بیشتر یا کم‌تر باشد.

در شکل ۶ توزیع فشار بالا برنده در زیر سد برای زمانی که ضریب اطمینان



شکل ۶. توزیع فشار بالا برنده‌ی زیر سد، هنگامی که ضریب اطمینان واژگونی کم‌ترین و بیشترین مقدار را دارد.

محیط پیوسته برای پی، کمینه و بیشینه ضریب اطمینان پایداری پی به ترتیب معادل ۸۷/۰ و ۴۵/۸ خواهد بود.

برای تعیین ضریب اطمینان در مقابل لغزش عمومی در پی با وجود دسته درزه های معرفی شده، از روش کاهش مقاومت برشی<sup>۴</sup> استفاده شده است.<sup>[۱۲]</sup> در واقع پارامترهای مقاومتی توده سنگ درزه دار-- شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت

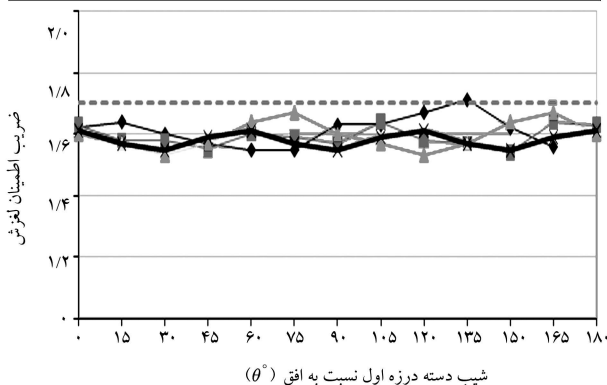
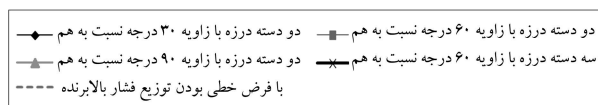
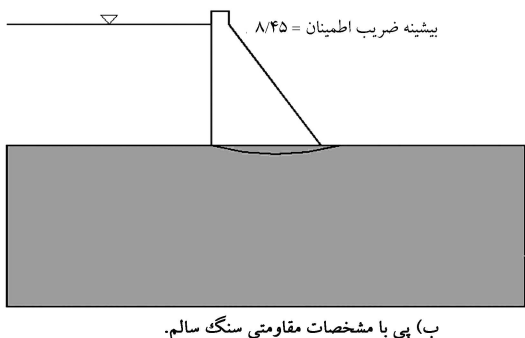
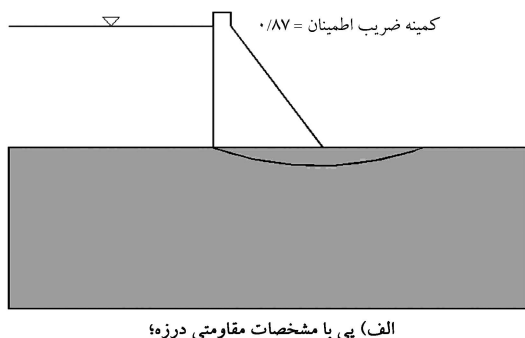
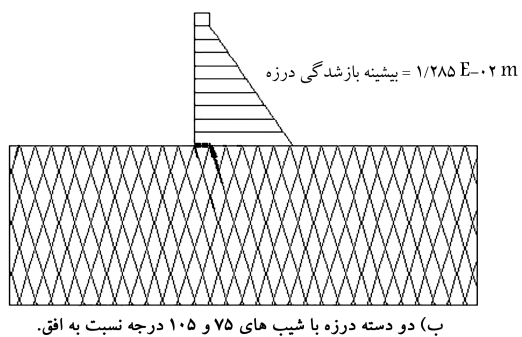
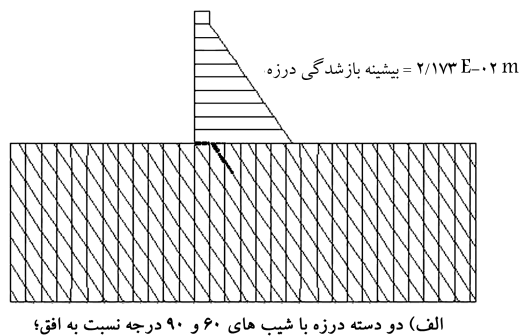
شکل ۴ استفاده شود، ضریب اطمینان در برابر لغزش نیز تابعی از شیب دسته درزه ها خواهد بود.

در شکل ۷ تأثیر شیب دسته درزه ها بر ضریب اطمینان لغزش نشان داده شده است. در تمام حالات ضریب اطمینان در برابر لغزش از مقدار ۱/۷ کم تر است، اگرچه نوسانات ضریب اطمینان لغزش چندان زیاد نیست و عملاً کم تر از ۵ درصد با مقدار تحلیلی فاصله دارد. مشابه این مسئله در نتایج حاصل از تحلیل های محققین مشاهده شده است.<sup>[۴]</sup> دلیل اصلی این مسئله را می توان در افزایش توزیع فشار بالا برنده در زیر سد جست و جو کرد.

مشخص است که در این وضعیت نیز بیشترین نوسان در ضریب اطمینان مربوط به دو دسته درزه با زاویه  $30^\circ$  درجه نسبت به هم است. همچنین دیده می شود که دامنه تغییرات ضریب اطمینان پایداری در سیستم پی با دو دسته درزه بیشتر از سه دسته درزه است، در حالی که متوسط ضریب اطمینان در سه دسته درزه کمی کم تر از حالات با دو دسته درزه است. در مواردی که شاهد کم ترین ضریب اطمینان لغزش بوده ایم، ترک کششی در پاشنه ی سد ایجاد شده و تا حدی پیش رفته است. ترک ایجاد شده باعث افزایش فشار آب در ناحیه ی ترک خورده و کاهش سطح تماس بتن و سنگ شده است. در شکل ۸ ناحیه ی ترک خورده ی زیر پی در دو حالت مختلف نشان داده شده است.

### ۳.۴. اثر شیب درزه ها بر پایداری پی

چنانچه مقاومت برشی پی معادل مقاومت برشی درزه ها یا خود سنگ سالم فرض شود، کمینه و بیشینه ضریب اطمینان لغزش در پی مذکور را می توان توسط نرم افزارهای تعادل حدی محاسبه کرد. در این نوشتار ارزیابی پایداری کلی سد و پی آن در دو حالت حدی فوق توسط نرم افزار slope/w<sup>[۱۱]</sup> انجام شده است. در هر دو حالت سطح آب در زیر پی به صورت خطی از بیشینه تراز ۹۰ متر در بالادست تا روی سنگ بستر در پایین دست تغییر یافته است. در فرض اول پی به صورت یک محیط پیوسته با مشخصات مقاومت برشی مشابه مشخصات درزه های توده سنگ در نظر گرفته شد. در این حالت که سطح لغزش آن در شکل ۹ الف مشاهده می شود، حداقل ضریب اطمینان برابر با ۸۷/۰ به دست آمد. در حالت دوم پی به صورت یک محیط پیوسته با مشخصات مقاومت برشی مشابه سنگ سالم فرض شد و کم ترین ضریب اطمینان برابر با ۴۵/۸ به دست آمد (شکل ۹ ب). بنابراین با فرض



شکل ۷. تأثیر شیب درزه ها بر ضریب اطمینان لغزش.

کششی -- به تدریج کاهش داده می‌شود:

$$C_{n+1} = \frac{C_n}{FS}$$

$$(\tan \varphi)_{n+1} = \frac{(\tan \varphi)_n}{FS}$$

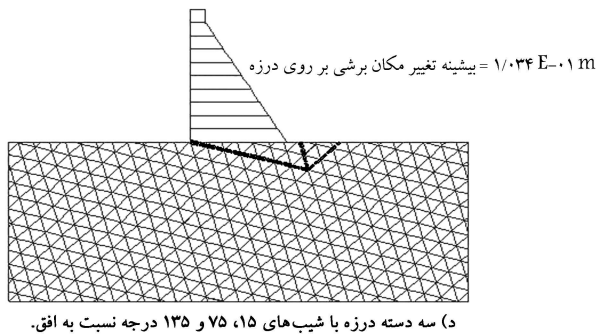
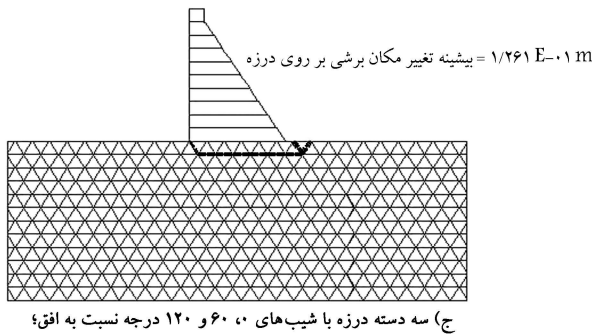
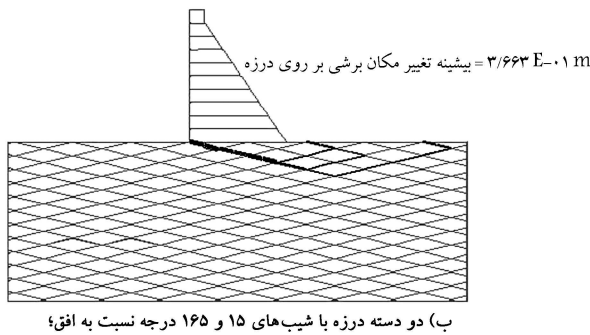
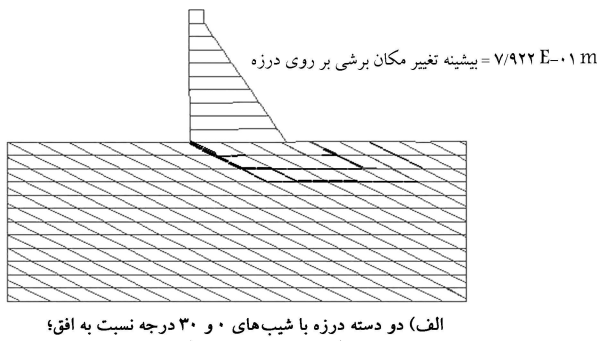
$$(\sigma_t)_{n+1} = \frac{(\sigma_t)_n}{FS} \quad (9)$$

در رابطه‌ی ۹،  $FS$  ضریب بزرگ‌تر از ۱ است. بدین‌منظور با کاهش پارامترهای بالا در هر مرحله، تحلیل کامل صورت می‌گیرد و این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که سرعت یا جابه‌جایی لغزشی در سد به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و سد عملاً ناپایدار می‌شود. افزایش سرعت و جابه‌جایی، هم‌زمان با کاهش سرعت هم‌گرایی و در بسیاری از موارد واگرایی تحلیل عددی همراه است. نسبت مقدار اولیه‌ی هر یک از پارامترهای فوق به مقدار کاهش‌یافته‌ی آن‌ها در زمان گسیختگی (یا مقدار نهایی  $FS$ )، ضریب اطمینان پایداری پی را مشخص می‌کند.

در چند مورد پس از آنگیری مخزن و قبل از تحلیل پایداری، پی دچار گسیختگی شد. شکل ۱۰ سطح لغزش را برای این موارد ناپایدار نشان می‌دهد. در تمام این موارد هندسه‌ی درزه‌ها به‌گونه‌ی است که تقاطع آن‌ها با یکدیگر سطوح لغزشی نزدیک به افق در پی ایجاد کرده است و موجب ناپایداری مجموعه‌ی سد و پی گشته است. ضریب اطمینان پایداری پی به‌روش کاهش مقاومت برشی برای مدل‌های تهیه‌شده با دسته‌درزه‌های مختلف محاسبه شدند که نتیجه‌ی آن‌ها در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. در این شکل برای موارد چهارگانه‌ی شکل ۱۰، که قبل از تحلیل پایداری دچار لغزش شده‌اند، ضریب اطمینان برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. یادآور می‌شود که ضریب اطمینان معادل ۱ در بعضی دیگر حالات نیز تکرار شده‌اند. به‌طور کلی ناپایدارترین حالت مربوط به زمانی است که سه دسته‌درزه با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به هم در توده‌سنگ پی وجود داشته باشد (شکل ۱۱)؛ تغییرات ضریب اطمینان پایداری پی با شیب درزه‌ها در این حالت یکنواخت‌تر بوده و عملاً در محدوده‌ی عدد ۱ نوسان دارد. این مسئله نشان می‌دهد که در این حالت نتیجه‌ی ضریب اطمینان به مقدار روش تعادل حدی (شکل ۹ الف) نزدیک شده است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه تعداد دسته‌درزه‌ها با توزیع یکنواخت و پارامترهای یکسان افزایش یابند، عملاً محیط همسان شده و عدد ضریب اطمینان به ضریب اطمینان حاصل از روش‌های مرسوم نزدیک‌تر می‌شود.

برای دو دسته‌درزه نیز در هر سه حالت مورد بررسی، مواردی با ضریب اطمینان پایین و نزدیک به ۱ وجود دارد. بنابراین تعیین شیب لایه‌ها در این مورد از اهمیت خاصی برخوردار است. زمانی که دو دسته‌درزه عمود بر یکدیگرند، در بیشتر موارد ضریب اطمینان پایداری پی مقدار بیشتری را نسبت به دیگر حالات دارد؛ هرچند که در این حالت نوسانات و تغییرات ضریب اطمینان با زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی اول نیز بیشترین است. با توجه به این تغییرات، رعایت دقت کافی در برآورد مشخصات هندسی و ژئوتکنیکی درزه‌ها به‌منظور ارزیابی پایداری عمومی آن‌ها تا رسیدن به قطعیت کافی در طراحی سدهای بتنی ضروری است.

در شکل ۱۲ میدان جابه‌جایی سد و پی، برای سد بسته‌شده بر دو دسته‌درزه‌ی عمود برهم، در ناپایدارترین و پایدارترین وضعیت نشان داده شده است. البته باید توجه داشت که میزان جابه‌جایی‌ها در لحظه‌ی نهایی گسیختگی است و به‌همین دلیل میزان آن‌ها از اهمیت چندانی برخوردار نیست. مشاهده می‌شود که نحوه‌ی گسیختگی پی در دو حالت قدری متفاوت است. زمانی که شیب لایه‌ی اول نسبت به افق ۳۰ درجه است (شکل ۱۲ الف)، سطح لغزش به عمق توده‌سنگ کشانده



شکل ۱۰. سطح لغزش مربوط به پی‌های ناپایدار.

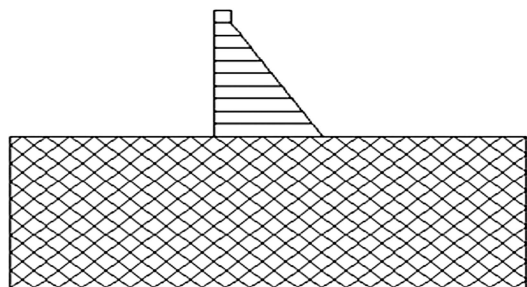
می‌شوند و این امر به مقاومت زیاد توده‌سنگ در برابر ناپایداری عمومی می‌انجامد و در نتیجه ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. اما زمانی که شیب لایه‌ی اول نسبت به افق ۷۵ درجه است (شکل ۱۲ ب) سد و قسمتی از پی از زیر پاشنه جدا شده و بر روی درزه‌ی با شیب نزدیک به افق لغزیده‌اند. این امر باعث شده که گسیختگی راحت‌تر اتفاق بیفتد و ضریب اطمینان بسیار کم‌تری به دست آید. نحوه‌ی گسیختگی دیگر مواردی که ضریب اطمینان نزدیک به ۱ دارند نیز مؤید این موضوع است. در واقع می‌توان علت نوسان زیاد ضریب اطمینان پایداری پی در سیستم دو دسته‌درزه را

می‌دهد که در انتخاب محل مناسب برای سدهای وزنی و طراحی آن‌ها باید تمام جنبه‌های پایداری در نظر گرفته شود تا ایمنی سد به خطر نیفتد.

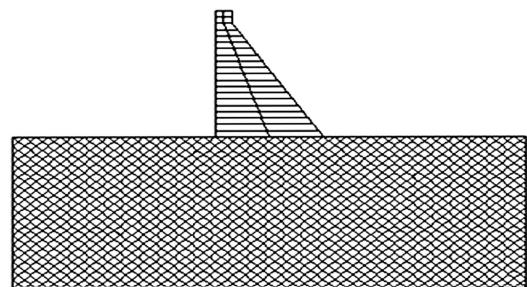
#### ۴.۴. اثر فاصله‌ی درزه‌ها و بازشدگی آن‌ها

با توجه به تأثیر فاصله‌ی درزه‌ها و بازشدگی آن‌ها بر رفتار هیدرومکانیکی سیستم درزه‌ها، در این قسمت نتیجه‌ی تحلیل حساسیت بر روی این دو پارامتر بررسی می‌شود. عطف به تعداد زیاد حالت‌های ممکن و به لحاظ شباهت زیاد رفتار، در این قسمت تنها مدل توده‌سنگ شامل دو دسته‌درزه‌ی عمود بر هم با شیب ۴۵ درجه نسبت به افق به‌عنوان مبنای کار انتخاب شده است. ابتدا ابعاد بلوک‌ها نصف، و سپس یک‌چهارم شد و نتایج با هم مقایسه شد. در شکل ۱۳ هندسه‌ی مدل برای سه حالت ابعاد بلوک‌ها نشان می‌دهد. چنان که در شکل دیده می‌شود هرچه ابعاد بلوک‌ها کوچک‌تر شود محیط پی به محیط پیوسته نزدیک‌تر می‌شود.

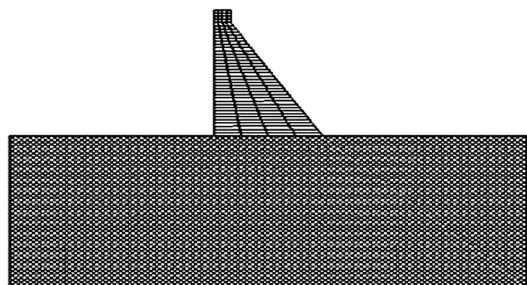
با کوچک شدن ابعاد بلوک‌ها تعداد درزه‌ها افزایش می‌یابد و این به معنای افزایش مسیرهای جریان است؛ در واقع دبی عبوری از توده‌سنگ افزایش یافته و عملاً مقدار فشار بالا برنده کاهش می‌یابد (شکل ۱۴). به‌عنوان نتیجه‌ی کلی می‌توان گفت با



الف) فاصله‌ی درزه‌ها ۱۰ متر؛

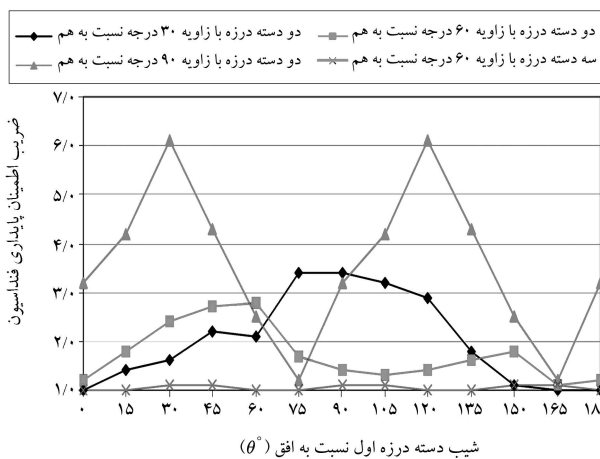


ب) فاصله‌ی درزه‌ها ۵ متر؛



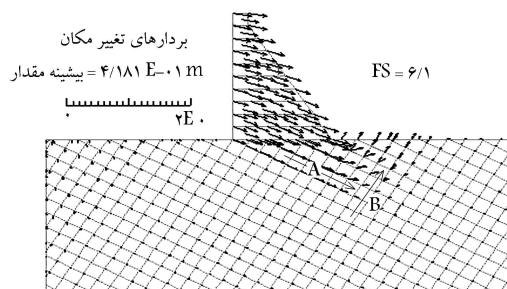
ج) فاصله‌ی درزه‌ها ۲/۵ متر.

شکل ۱۳. هندسه‌ی مدل.

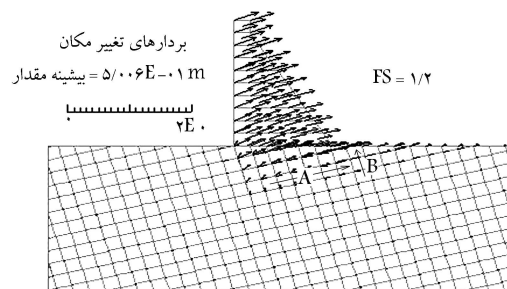


شیب دسته درزه اول نسبت به افق (θ°)

شکل ۱۱. تأثیر شیب درزه بر ضریب پایداری پی.



الف) دو دسته درزه با شیب‌های ۳۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به افق؛



ب) دو دسته درزه با شیب‌های ۷۵ و ۱۶۵ درجه نسبت به افق.

شکل ۱۲. میدان جابه‌جایی سد و پی پس از گسیختگی.

در نحوه‌ی تشکیل بلوک‌های لغزشی جست‌وجو کرد؛ گاه سیستم درزه‌ها منجر به تشکیل سازوکار گسیختگی محتمل‌تری می‌شوند و گاه خود باعث ایجاد مقاومت اضافی نسبت به نوع دیگری از سیستم درزه‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال مشاهده می‌شود که در دو حالت حدی شکل ۱۲، وقوع ناپایداری منجر به حرکت بلوک‌ها به سمت راست شده است، با این تفاوت که در حالت الف حرکت بلوک‌ها در راستای A منجر به فشار بیشتر بر بلوک‌های راستای B شده و عملاً مقاومت برشی در راستای B افزایش می‌یابد اما در حالت ب به دلیل آزادی حرکت بیشتر بلوک‌ها در مسیر A عملاً فشار زیادی در راستای B وجود نخواهد داشت و بدین ترتیب این بلوک‌ها راحت‌تر می‌لغزند.

از مقایسه‌ی شکل‌های ۵، ۷ و ۱۱ درمی‌یابیم که ضریب اطمینان‌های واگونی و لغزش پی با ضریب اطمینان پایداری کلی پی هماهنگ نیست. این مطلب نشان



درزه‌ها بر انواع پایداری سد نیز مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به تغییرات کم آن تأثیر بسیار کمی در نتایج حاصله داشت.

یادآور می‌شود که عوامل دیگری در رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ پی و در نتیجه در میزان پایداری سیستم سد و تکیه‌گاه موثر است که در این نوشتار بررسی نشده است؛ تغییر در خواص درزه‌ها، تداوم درزه‌ها، وجود لایه‌بندی‌های مشخص، منظم یا تصادفی بودن دسته‌درزه‌ها و... از این جمله‌اند، که در این فرصت سعی شد تنها اهمیت برخی پارامترهای مهم مورد توجه قرار گیرد.

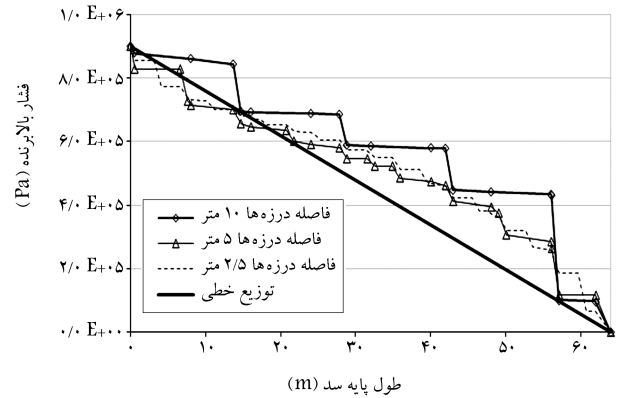
## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء مجزا پایداری یک سد بتنی وزنی تحت شرایط مختلف توده‌سنگ تکیه‌گاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. توده‌سنگ تکیه‌گاه به صورت یک محیط ناپیوسته با دو و سه دسته‌درزه منظم مدل شده که دو دسته‌درزه با زاویه‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و سه دسته‌درزه با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند. در تمام حالات دسته‌درزه‌ی اول از زاویه‌ی ۰ تا ۱۸۰ درجه و با فواصل ۱۵ درجه، نسبت به افق تغییر می‌کند. در هر حالت مراحل ساخت سد و آبیگری آن تحلیل شد و سپس توزیع فشار بالا برنده‌ی زیر سد، پایداری در برابر واژگونی حول پنجه، پایداری در برابر لغزش در پایه، وقوع ترک کششی در پایه و پایداری پی سد، مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل حساسیتی نیز بر روی فاصله درزه‌ها و بازشدگی آن‌ها انجام شد.

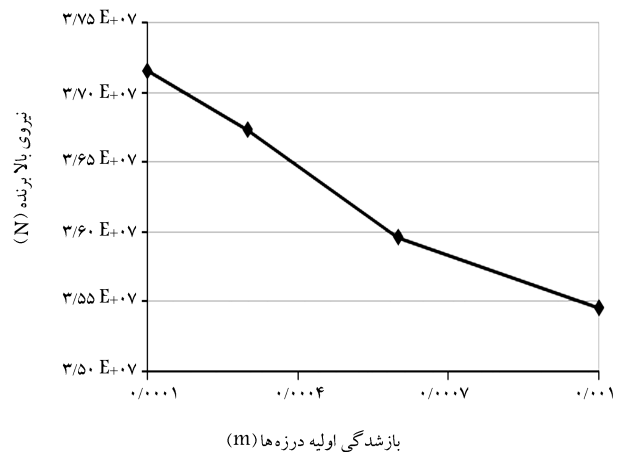
نتایج حاصل از تحلیل فوق نشان می‌دهد که برای تخمین بهتر میدان تغییر شکل، توزیع فشار بالا برنده و محاسبه‌ی ضرایب اطمینان پایداری در زیر سد ضرورت می‌یابد. اثرات هیدرومکانیکی توده‌سنگ تکیه‌گاهی با استفاده از روش‌های عددی در محیط ناپیوسته مورد توجه قرار می‌گیرد. در مقایسه با حالت پی به صورت محیط پیوسته، توده‌سنگ درزه‌دار تحت تغییر مکان‌های بیشتری قرار می‌گیرد که منجر به تغییرات فاحش در خواص هیدرولیکی درزه‌ها شده که هنگام محاسبه‌ی فشار برخاستی لازم است مورد توجه قرار گیرد.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که در اکثر حالات سیستم درزه‌ها در پی، فشار بالا برنده محاسبه شده زیر سد از توزیع خطی که در طراحی این‌گونه سدها مورد استفاده قرار می‌گیرد بیشتر است. به همین دلیل ضریب اطمینان در برابر واژگونی سد و لغزش بر روی پایه سد نیز کم‌تر از روش‌های مرسوم به دست می‌آیند. وابستگی فشار بالا برنده و ضریب اطمینان در برابر انواع ناپایداری‌های مورد بررسی به شیب دسته‌درزه‌ها، در سیستم دو دسته‌درزه بیشتر از سیستم سه دسته درزه است؛ در حالت اخیر که درزه‌ها دارای زاویه بین ۶۰ درجه‌اند عملاً شرایط پی به شرایط همسان نزدیک می‌شود.

در سیستم پی با دو دسته درزه، بیشترین وابستگی در توزیع فشار بالا برنده و در نتیجه ضریب اطمینان واژگونی و لغزش در پایه سد در وضعیتی اتفاق می‌افتد که دو دسته درزه دارای زاویه بین ۳۰ درجه در پی قرار گرفته باشد در حالی که این وابستگی در ضریب اطمینان پایداری عمومی پی در سیستم درزه‌های متعامد بیشتر است؛ این مسئله به دلیل امکان جابه‌جایی بلوک‌های سنگی در جهات خاص و تشکیل سازوکار گسیختگی محتمل‌تر در امتداد برخی از دسته‌درزه‌ها است. با افزایش فاصله درزه‌ها و نیز کاهش بازشدگی آن‌ها میزان فشار بالا برنده زیر سد افزایش یافته است. (یادآور می‌شود در این نوشتار فاصله‌ی درزه‌ها همواره از عرض پایه‌ی سد کم‌تر بوده است).



شکل ۱۴. تأثیر فاصله‌ی درزه‌ها بر فشار بالا برنده در زیر سد.



شکل ۱۵. تأثیر بازشدگی اولیه در مقدار نیروی بالا برنده در زیر سد.

کوچک شدن فاصله‌ی درزه‌ها، فشار بالا برنده تا حدی به توزیع فشار خطی نزدیک‌تر می‌شود.

در سیستم درزه‌های فوق، کاهش فشار بالا برنده به دنبال کم شدن فاصله‌ی درزه‌ها باعث افزایش پایداری در برابر واژگونی و لغزش سد می‌شود. اما این افزایش ناچیز تنها در حد ۰/۱ به ضریب اطمینان واژگونی و لغزشی سد کمک می‌کند. مورد مهم‌تر، پایداری پی است که با کوچک شدن بلوک‌ها و افزایش تعداد درزه‌ها به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد، به گونه‌ی که با نصف و یک‌چهارم شدن ابعاد بلوک‌ها مقدار ضریب پایداری پی به ترتیب از ۴/۳ به ۲/۵ و ۲/۲ کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان ناشی از لغزش راحت‌تر بلوک‌های کوچک در کنار یکدیگر و امکان تشکیل مسیرهای لغزش نزدیک به دایره بر اثر تقاطع درزه‌ها دانست.

در تحلیل‌های دیگر، ۴ مقدار مختلف برای بازشدگی اولیه‌ی درزه‌ها تعیین و برای هر کدام تحلیل هیدرومکانیکی کامل بر روی مدل انجام شد. نتایج نشان داد که بازشدگی درزه‌ها بر دبی عبوری از پی سد تأثیر به‌سزایی دارد، به طوری که با ۱۰ برابر شدن بازشدگی اولیه درزه‌ها، مقدار دبی خروجی بیش از ۱۰۰۰ برابر می‌شود. البته این مسئله توسط رابطه‌ی ۳ نیز قابل پیش‌بینی بود چرا که دبی درزه با توان سوم بازشدگی آن در ارتباط است. با توجه به افزایش دبی خروجی بر اثر افزایش بازشدگی اولیه‌ی درزه‌ها، قاعدتاً انتظار می‌رود که فشار بالا برنده‌ی زیر پی کاهش یابد. با افزایش بازشدگی درزه سرعت جریان در توده‌سنگ افزایش می‌یابد و همین امر باعث کاهش فشار آب در زیر سد می‌شود (شکل ۱۵). اثر بازشدگی اولیه‌ی

### پانوشت

1. discontinuous deformation analysis
2. compressible
3. isotrop
4. strength reduction technique

### منابع

1. Abrishami, J. and Vahhab Rajaei, N. "Concrete dams: Design and construction", Astane Ghodss Razavi, pp. 93-104 (1380).
2. US Army Corps of Engineers "Engineering and design: Gravity dam design," EM 1110-2-2200, pp. 3-4 (1995).
3. Kim, Y.I.; Amadei, B. and Pan, E. "Modeling the effect of geology on uplift in concrete gravity dam foundations with the discontinuos deformation analysis", *Rock Mechanics for industry*, pp. 527- 534 (1999).
4. Barla, G.; Bonini, M. and Cammarata, G. "Stress and seepage analysis for a gravity dam on a jointed granitic rock mass", *Numerical Modeling of Discrete Materials*, Konietzky, pp. 263-268 (2004).
5. Dolezalova, M. "Numerical analysis of an old masonry dam using UDEC", *Numerical Modeling of Discrete Materials*, Konietzky, pp. 269-277 (2004).
6. Gimenes, E. and Fernández, G. "Hydromechanical analysis of flow behavior in concrete gravity dam foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, **43**, pp. 244-259 (2006).
7. Yazdani, S., *Evaluation of Hydromechanical Behavior of Jointed Rock Mass on Stability of Concrete Arch Dam Abutments*, M.Sc thesis, Tarbiat Modarres University (1385).
8. Itasca Consulting Group, Inc. UDEC - Universal Distinct Element Code, Ver. 3.1 (2000).
9. Pande, G.N.; Beer, G. and Williams, J.R., *Numerical Methods in Rock Mechanics*, John Wiley & Sons LTD (1990).
10. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, "Design of Small Dams", Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. (2004).
11. GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada. SLOPE/W, Ver. 5 (2002).
12. Dawson, E.M.; Roth, W.H. and Drescher, A. "Slope stability analysis by strength reduction", *Géotechnique*, **49**(6), pp. 835-840 (1999).