



## بررسی پتانسیل ریزشویی در پی آبرفتی سدها (مطالعه موردی: سد بار نیشابور)

ملیحه نظری<sup>۱</sup>، محمدعلی معروف<sup>۲</sup>، علی اخترپور<sup>۳\*</sup>، جعفر بلوری بزازی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (maliheh.nazari@mail.um.ac.ir)

۲- دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، ایران (m\_alimarroof@yahoo.com)

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (akhtarpour@um.ac.ir)

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (bolouri@um.ac.ir)

### خلاصه

پدیده ریزشویی یکی از انواع فرسایش داخلی در خاک است که می‌تواند در محل سدها باعث به وجود آمدن مشکلاتی از قبیل ایجاد فروچاله در بستر سد و یا ریزش سد شود. به همین دلیل، شناخت این پدیده و بررسی استعداد ریزشویی خاک‌های این‌گونه مناطق اهمیت دارد. برای پیش‌بینی پدیده ریزشویی، می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و معیارهای تجربی بهره برد. در خصوص این پدیده، افراد زیادی مانند کنی و لو، وان و فل، شرارد و ... معیارهایی ارائه داده‌اند. باتوجه به فروچاله‌هایی که بعد از آگیری‌های آزمایشی در بستر سد بار نیشابور به وجود آمده است، یکی از دلایل ایجاد این پدیده، می‌تواند فرسایش داخلی و به طور دقیق‌تر، ریزشویی باشد. در این تحقیق، بعد از گرفتن نمونه‌هایی از بستر سد بار و رسم نمودار دانه‌بندی آن، پتانسیل ریزشویی با استفاده از معیارهای تجربی موجود، بررسی شد. هرچند نتایج معیارها در همه نمونه‌ها یکسان نیست، ولی باتوجه به آبرفتی بودن بستر سد که احتمال وقوع این پدیده را افزایش می‌دهد و همچنین فروچاله‌های ایجاد شده بعد از آگیری در بعضی مناطق، به خصوص در نواحی نزدیک به فروچاله‌های ایجاد شده، احتمال وجود پتانسیل ریزشویی در خاک افزایش پیدا می‌کند.

**کلمات کلیدی:** فرسایش داخلی، فروچاله، سد بار، دانه‌بندی مقعر.

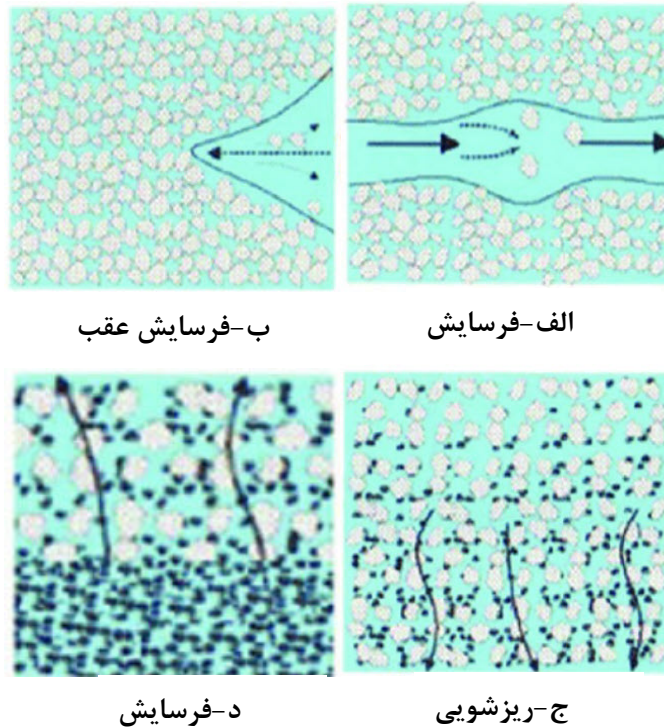
### ۱. مقدمه

سازه‌های هیدرولیکی یکی از سازه‌های عمرانی محسوب می‌شود که وظیفه آنها حفظ یا انتقال آب است و فرسایش داخلی یکی از عواملی است که می‌تواند باعث از دست رفتن عملکرد اصلی این سازه‌ها شود. ترزاقی از اولین افرادی بود که به بررسی شکست در سازه‌های هیدرولیکی پرداخت، او یکی از مکانیسم‌های شکست را نیروهای هیدرودینامیکی تشخیص داد و آن را فرسایش داخلی یا فرسایش زیرسطحی نامید [۱]. مطالعات بعدی نشان داد که فرسایش داخلی می‌تواند به چهار شکل فرسایش متمرکز، فرسایش عقب رونده، فرسایش تماسی و ریزشویی رخ دهد [۲]. در شکل ۱ تصویری از چهار نوع فرسایش داخلی مشاهده می‌شود.

در این مطالعه به بررسی ریزشویی به‌عنوان یکی از انواع فرسایش داخلی پرداخته شده است. ریزشویی یکی از انواع فرسایش داخلی در خاک محسوب می‌شود که شامل فرسایش ذرات ریز درون ماتریس ذرات درشت تحت جریان نشت

است. حفراتی که به دلیل آبستگي دانه‌های خاک به وجود می‌آیند، حفرات زیرسطحي هستند که امکان ناپایداری آن‌ها در زلزله وجود دارد و موجب فرونشست زمین و آسیب رساندن به سازه خواهند شد [۳].

ریزشویی به دو نوع داخلی و خارجی تقسیم می‌شود. نوع اول با توزیع مجدد ذرات ریز، هدایت هیدرولیکی محلی را تغییر می‌دهد بدون اینکه تغییر قابل‌توجهی در حجم جامد کلی ایجاد کند. نوع دوم ریزشویی به تخلیه ذرات ریز از ماتریس جامد مربوط است؛ در این مدت حجم ماتریس کاهش یافته و رسانایی هیدرولیکی آن افزایش می‌یابد [۱].



شکل ۱- انواع فرسایش داخلی

برای وقوع ریزشویی در یک خاک ناپایدار لازم است شرایط هیدرولیکی کافی نیز وجود داشته باشد. تحقیقات تجربی نشان می‌دهد گرادیان آستانه جریان آب برای وقوع ریزشویی در خاک‌های ناپایدار داخلی حتی می‌تواند در حد  $0/1$  باشد؛ بنابراین در صورتی که خاکی از نظر دانه‌بندی مستعد برای وقوع این پدیده باشد و این خاک در معرض جریان‌های هیدرولیکی قرار گیرد، احتمال وقوع فرسایش از نوع ریزشویی در آن توده خاک بسیار بالا است [۱].

## ۲. روش‌های شناسایی خاک‌های ناپایدار داخلی

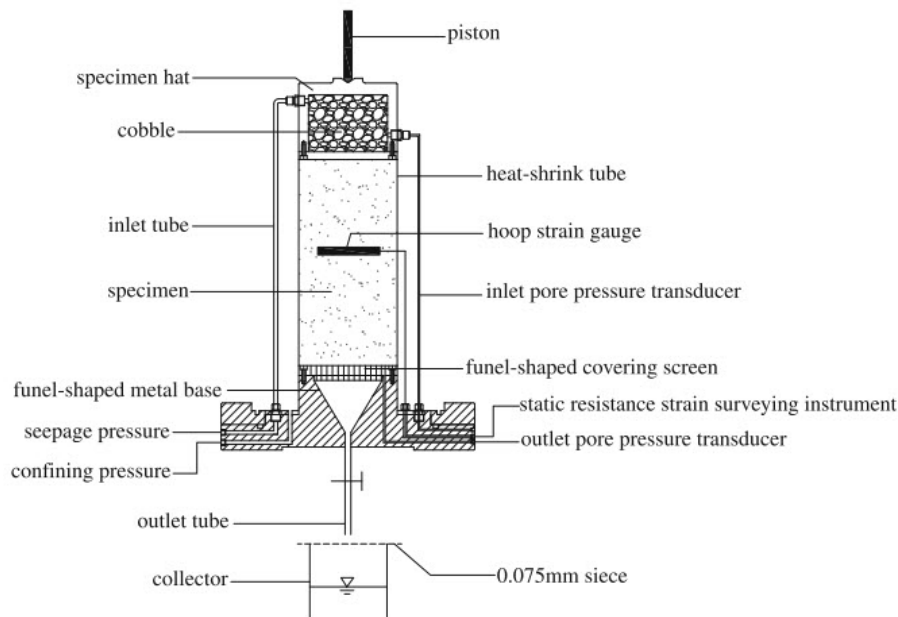
انجام آزمون‌های آزمایشگاهی معتبرترین روش برای تشخیص خاک‌های ناپایدار داخلی است لیکن ممکن است به عللی از جمله مسائل اقتصادی انجام مطالعات آزمایشگاهی میسر نباشد، در چنین مواقعی پیشنهاد استانداردهای معتبر نظیر ICOLD و USBR استفاده از روش‌های تجربی است. روش‌های تجربی متعددی برای شناسایی ناپایداری داخلی خاک‌ها وجود دارد، در این روش‌ها مبنای اصلی قضاوت توزیع دانه‌بندی خاک است. در جدول ۱ روابط استفاده شده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۱- معیارهای دانه‌بندی

روش بررسی ناپایداری	درصد ریزدانه	شرایط دانه‌بندی	نام معیار
پایدار: $c_u \leq 10$	-	-	istomina[4]
ناحیه انتقالی: $10 \leq c_u \leq 20$	-	-	
ناپایدار: $c_u \geq 20$	-	-	
پایدار: $(H/F)_{min} \geq 1.3$	-	-	Kenny & lau[5]
پایدار: $(H/F)_{min} \geq 1$	-	-	Sherard[6]
پایدار: $0.76 \log(h'') + 1 \leq h' \leq 1.68 \log(h'') + 1$	-	-	burenkova[7]
و $30 / \log(d_{90} / d_{60}) < 80$ پایدار: $15 / (d_{20} / d_5) > 22$	-	-	Wan & fell[8]
پایدار: $(H/F)_{min} > 1$	$p < 5$	Well-graded soil	Chang & zhang[9]
پایدار: $(H/F)_{min} > -(1/15)p + 4/3$	$5 < p < 20$		
پایدار	$p > 20$		
پایدار: $Gr < 3$	$p < 10$	Gapgraded soil	
پایدار: $Gr < 0.3p$	$10 \leq p \leq 35$		
پایدار	$p > 35$		

$C_u =$  ضریب یکنواختی؛  $F = d$  قطر از ریزتر از درصدانه‌های ریزتر از قطر  $H = d$  و  $4d$  درصد دانه های بین  $h' = d_{90}/d_{60}$ ؛  $h'' = d_{90}/d_{15}$ .

در روش‌های آزمایشگاهی، با استفاده از یک دستگاه می‌توان به بررسی پتانسیل ریزشویی پرداخت. در شکل ۲، نمونه‌ای از این دستگاه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه‌ای از دستگاه آزمایش ریزشویی [10]

در این روش، با توجه به میزان ریزدانه شسته شده و مقدار نشست نمونه در انتهای آزمایش، پتانسیل ریزشویی خاک بررسی می‌شود. در حال حاضر نیز محققان این پژوهش بعد از ساخت دستگاه، در حال بررسی آزمایشگاهی پتانسیل ریزشویی خاک هستند.

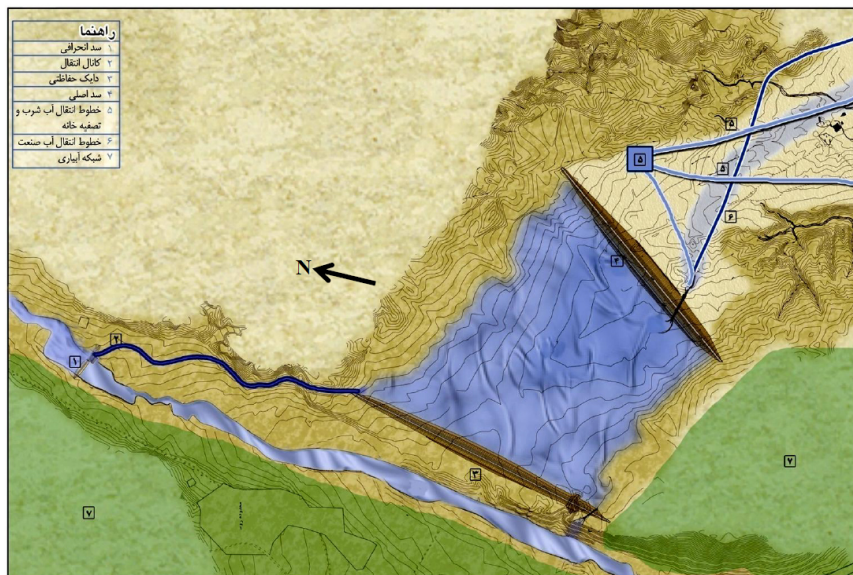
### ۳. سد بار و طرح سد بار

طرح سد بار در ۲۳ کیلومتری شمال غرب شهرستان نیشابور و شمال شرق شهر فیروزه (بزغان) در مجاورت روستای حسین‌آباد واقع است. مخزن طرح بار در خارج از بستر رودخانه بار نیشابور در دره‌ای عریض و روی پی آبرفتی درشت‌دانه عمیقی احداث شده است. مخزن سد از سمت شرقی توسط بدنه سد اصلی و از سمت غربی توسط بدنه سد فرعی محدود می‌گردد. در شکل ۳ یک سیمای کلی از سد نشان داده شده است.

اهداف کلی از احداث طرح بار عبارت‌اند از:

- تأمین آب شرب شهرستان نیشابور به میزان ۷ میلیون مترمکعب در سال.
- تأمین آب صنعت و مجتمع فولاد خراسان به میزان ۵ میلیون مترمکعب در سال.
- مهار سیلاب و جلوگیری از خسارت سیلاب به اراضی و روستاهای مسیر رودخانه.
- تغذیه سفره آب زیرزمینی دشت نیشابور.

در این سد با توجه به نفوذپذیری بالای مخزن، یک لایه بلانکت در کف مخزن برای جلوگیری از نفوذ زیاد آب، و روی آن نیز یک لایه محافظ شن رس دار اجرا شده است.



شکل ۳-سیمای کلی طرح سد بار

در حین آبگیری‌های آزمایشی، وقوع آثاری از فرسایش داخلی در کف مخزن سد بار سبب گردید که بررسی پتانسیل وقوع این پدیده در پی مخزن بار مورد توجه مسئولان طرح قرار گیرد. در شکل ۴ نمایی از فروچاله‌های ایجاد شده، نشان داده شده است.



شکل ۴-فروچاله‌های مشاهده شده بعد از آبگیری

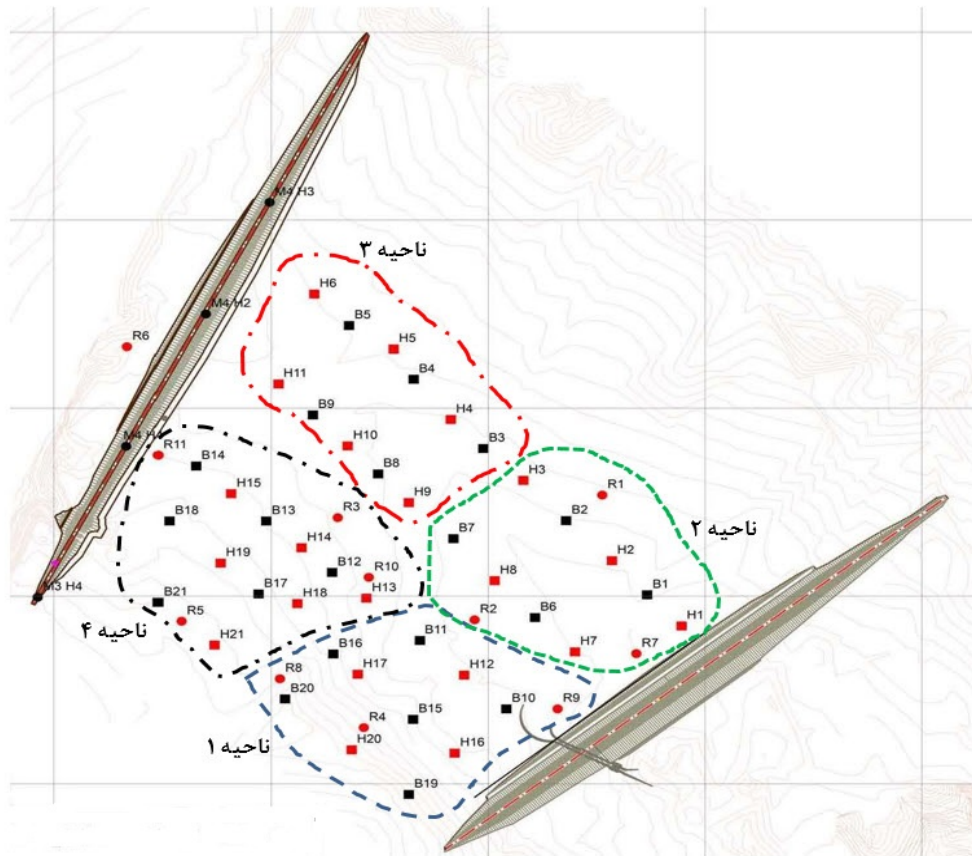
بعد از مشاهده فروچاله‌ها، برای بررسی دقیق‌تر آب مخزن پایین آورده شد، با پایین آمدن سطح آب، فروچاله‌ها با فرسایش عقب رونده گسترش یافتند که در شکل شماره ۵ نشان داده شده است.



شکل 5- فروچاله‌ها بعد از تخلیه مخزن سد

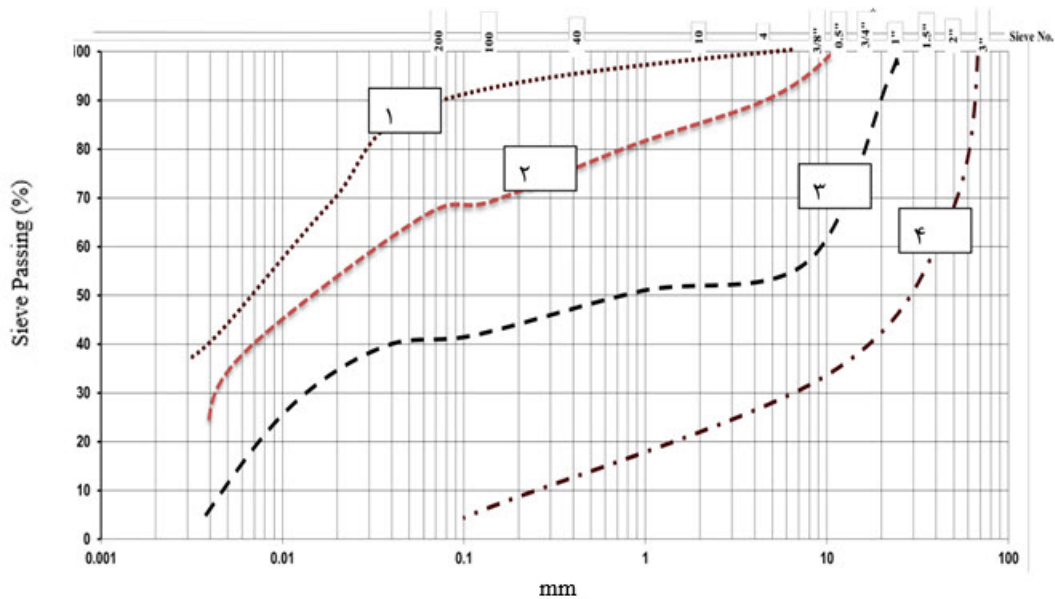
#### ۴. محاسبات

به دلیل گستردگی و وسعت محدوده مخزن در بین سدهای اصلی و فرعی بار نیشابور، بررسی و مطالعه شرایط آبرفت در کف مخزن سد نیازمند تقسیم‌بندی محدوده کف مخزن به نواحی متفاوت است. به بیان دیگر لازم است که پی آبرفتی در پلان به نواحی مختلف و در عمق به افق‌های متفاوت تقسیم شود تا امکان مطالعه و بررسی آنها مهیا گردد. در شکل ۶ محدوده کف مخزن به چهار ناحیه به ترتیب از ۱ تا ۴ شماره‌گذاری و تقسیم‌بندی شده‌اند. ملاک و اساس تقسیم‌بندی آبرفت‌های کف محدوده مخزن بر اساس رفتار و مشاهدات فروچاله‌های ایجاد شده در کف مخزن در مراحل آبرفتی اولیه است.



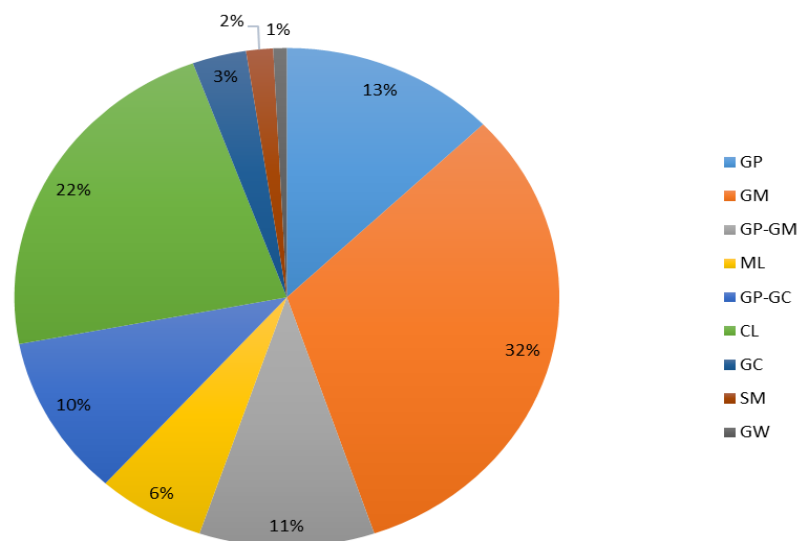
شکل ۶- تقسیم بندی نواحی مختلف پی آبرفتی در کف مخزن سد بار نیشابور

برای تمامی نمونه‌های گرفته شده از گمانه‌ها، آزمایش دانه‌بندی انجام شد، شکل کلی دانه‌بندی در تصویر شماره ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در شکل ۷ چهار نوع دانه‌بندی وجود دارد. برای بررسی بیشتر انواع خاک موجود در مخزن با توجه به فراوانی نوع خاک، نمودار دایره‌ای رسم شد. در نمودار دایره‌ای که در شکل ۸ نشان داده شده است، طبقه‌بندی نوع خاک برای همه گمانه‌های بررسی شده در مخزن نشان داده شده است.



شکل ۷- شکل کلی دانه بندی سد بار

باتوجه به نمودار دانه بندی شکل ۷ تعدادی از نمونه ها دارای نمودار دانه بندی گسسته و مقعر (نمودار ۳ و ۴) هستند که این نوع خاک ها می توانند دارای پتانسیل ریزشویی باشند [۱۱]. همچنین نوع خاک نیز برای همه نمونه ها مشخص شده و نمودار فراوانی آن به صورت زیر نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۸ دانه بندی GM یا شن سیلتی بیشترین فراوانی را در طبقه بندی خاک بستر سد دارد.



شکل ۸- طبقه بندی کف مخزن از نظر دانه بندی





در ادامه تعدادی از گمانه‌ها انتخاب شد و با استفاده از روش‌های بیان شده در قسمت قبل ناپایداری داخلی آن بررسی شد. در این قسمت سعی شد از همه گمانه‌ها و عمق‌ها حداقل یک نمونه انتخاب شود.

جدول 2- نتایج بررسی شرایط پایداری گمانه‌های انتخابی

ناحیه	عمق	نام	وان و فل	چانگ و ژانگ	ایستومینا	بور نکوا	شرارد	کنی و لو
۱	۲-۰	h12	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	پایدار	ناپایدار
		h7	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۲	۲-۰	h8	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h9	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
۳	۲-۰	h10	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h13	پایدار	پایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
۴	۲-۰	h15	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h18	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۱	۴-۲	h16	انتقالی	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h17	انتقالی	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار	ناپایدار
۲	۴-۲	h7	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
		b6	پایدار	پایدار	ناپایدار	پایدار	پایدار	ناپایدار
۳	۴-۲	h9	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h18	پایدار	ناپایدار	پایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
۴	۴-۲	h19	انتقالی	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h21	انتقالی	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۱	۶-۴	h12	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h16	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۲	۶-۴	h20	انتقالی	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h2	انتقالی	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
۳	۶-۴	h7	انتقالی	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h9	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار
۴	۶-۴	h11	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h13	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
	۶-۴	h18	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
		h21	پایدار	ناپایدار	پایدار	پایدار	ناپایدار	ناپایدار

کلمه انتقالی در جدول ۲ به این معنی است که خاک در مرز بین پایداری و ناپایداری قرار گرفته است.



## ۵. نتیجه‌گیری

همان‌طور که در تصویر ۴ نیز نشان داده شدحتی با اجرای بلانکت در مخزن سد، بعد از اولین آبیگری، فروچاله‌هاییبه وجود آمد که یکی از دلایل ایجاد آن می‌تواند پدیده ریزشویی باشد، باتوجهبه جدول ۲ مشاهده می‌شود که خاک مخزن عمدتاً در گروه خاک‌های ناپایدار داخلی قرار دارد. وقوع فرسایش با مکانیزم ریزشویی در این نوع خاک‌ها بسیار محتمل است و فرو چاله‌های ایجاد شده در مخزن سد بعد از آبیگری به‌احتمال‌قوی ناشی از ریزشویی است.

نکته قابل‌توجه دیگر اختلافات نتایج معیارها در برخی نمونه‌ها است، معیار کنی و لو تقریباً تمام نمونه‌ها را ناپایدار برآورد می‌کند، و در معیارهای دیگر تعدادی از نمونه‌ها پایدار و تعدادی ناپایدار به دستمی‌آیند، باتوجهبه اینکه معیار چانگ و ژانگ نسبت به دیگر معیارها جدیدتر بوده و بر اساس نوع دانه‌بندی معیار متفاوتی ارائه کرده است می‌تواندموردتوجه قرار گیرد.

همچنین باتوجهبه شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود که اکثر خاک مخزن GM تشکیل داده استکه باتوجهبه استاندارد USCS جزء خاک‌های درشت‌دانه محسوب می‌شود که دارای دانه‌بندی مقعر روبه‌بالا هستند، این نوع خاک‌ها پتانسیل ریزشویی بالایی نیز دارند [۱۱].

## ۶. مراجع

[1] Bonelli, S. (2013), "Erosion of Geomaterials". John Wiley and Sons, doi:10.1002/9781118561737.

[2] Fell, R. and MacGregor, P. and Stapledon, D. and Bell, G. (2005), "Geotechnical Engineering of Dam", doi: 10.1201/NOE0415364409.

[3] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن وزارت راه و شهرسازی. (۱۳۹۲)، " طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)", ویرایش چهارم.

[4] Istomina, V. (1957), "Filtration Stability of Soils". Mockow.

[5] Kenny, T. and Lau, D. (1985), "Internal stability of granular filters". Canadian Geotechnical Journal, pp. 215–225, doi: 10.1139/t85-029.

[6] Sherard, J. and Dunnigan, L. (1989), "Critical filters for impervious soils". Geotechnical Engineering, vol. 115, no. 7, pp. 927–947, doi: 10.1061.

[7] Burenkova, V. (1993), "Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. in Proceedings of Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, pp. 357–360.

[8] Wan, C. F. , and Fell, R. (2008), "Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations". J. Geotech. Geoenvironmental Eng., vol. 134, no. 3, pp. 401–407, doi:10.1061/(asce)1090-0241(2008)134:3(401),2008.

[9] Chang, D. S. and Zhang, L. M. (2013), "Extended internal stability criteria for soils under seepage". Soils Found, vol. 53, no. 4, pp. 569–583, doi:10.1016/j.sandf.2013.06.008.

[10] Lou, Y. L. and Zhan, M. L. (2013), "Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads". Nat Hazards, 65:1361-1377,

doi: 10.1007/s11069-012-0415-y, 2013.

[۱۱] طباطبایی شوربجه، پ.، سروش، ع. ومیری دیسفانی، و م. (۱۳۸۹)، "شناسایی پدیده ریزشویی و خاکهای ناپایدار داخلی"، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.