توسعه روش شبه‌استاتيک براي تحليل لرزه‌اي سدهاي خاكي

مهدي شيردل[i]؛ علي قنبري[ii] *؛ محمد داودي[iii]

چكيده

روش شبه‌استاتيک يكي از روش‌هاي كاربردي براي تحليل لرزه‌اي سدهاي خاكي به شمار مي‌رود. انتخاب ضريب لرزه‌اي مناسب، اولين گام موثر براي رسيدن به نتايج مطلوب در اين روش است. در گذشته نظرات زيادي بدون توجه به مشخصات هندسي، ديناميكي و هم‌چنين اثرات ساختگاه، براي تخمين ضريب شبه‌استاتيک ارائه شده است. بنابراين به منظور ارائه روشي دقيقتر، سد مسجد سليمان به عنوان مطالعه موردي انتخاب شده و با بهره‌گيري از نتايج تحليل‌هاي استاتيكي، شبه‌استاتيكي و ديناميكي با روش اجزاء محدود، به بررسي اثرات هندسه سد در تعيين ضريب شبه‌استاتيک پرداخته شده است. در رابطه پيشنهادي، تغيير شتاب در ارتفاع به صورت خطي فرض شده است. نرخ اين تغيير در شتاب به خصوصيات هندسي بدنه سد، سختي خاک و مشخصات ميرايي بستگي دارد. بنابراين در اين تحقيق خصوصيات هندسي بررسي شده است. نتايج نشان مي‌دهند كه با افزايش ارتفاع بدنه سد خاكي، نرخ افزايش شتاب اعمالي كاسته شده و با تندتر شدن شيب بدنه، نرخ شتاب افزايش مي‌يابد. به اين ترتيب با در نظر گرفتن اين تغييرات در ضريب شبه‌استاتيک پيشنهادي، در جهت دقيق نمودن روش شبه‌استاتيک، گام موثري برداشته شده است.

كلمات كليدي

سدهاي خاكي، تحليل استاتيک، تحليل شبه‌استاتيک، تحليل ديناميكي، سد مسجد سليمان

Development of Pseudo-Static Method for Stability Analyses of Embankment Dams

M. Shirdel; A. Ghanbari; M. Davoodi

ABSTRACT

Pseudo-static analysis is a common and simple method for the evaluation of seismic stability in embankment dams. Selection of the horizontal Pseudo-static coefficient is a primary step for evaluation of seismic behavior of embankment. Previous researchers and design manuals of embankment dams often suggest constant values for selecting the seismic coefficient regardless of site seismicity and the dynamic characteristics of the structures. In order to evaluate geometric effect, pseudo-static, static and dynamic analyses of the Masjed Soleiman dam With Finite Element Method performed and then precise a new equation to determine the pseudo-static coefficient of earth dams. In this equation, variations in acceleration for height of the dam, considered linear and the gradient of this line related to the geometrical characteristics of the dam body, soil stiffness and damping values. Result of this research imply that with increasing height of dam, decrease gradient of acceleration and with increasing slope of dam, increase gradient of acceleration.

KEYWORDS

Earth Dams, Pseudo Static, Dynamic Analyses; Horizontal Acceleration Coefficient; Seismicity

---

تاريخ دريافت مقاله: ۱۳۸۸/۶/۱۰
تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۹/۱۶

[i] مربی، دانشگاه آزاد اسلامي، واحد مراغه، باشگاه پژوهشگران جوان؛ m.shirdel@email.com

[ii] *نويسنده مسئول و دانشيار، گروه مهندسي عمران، دانشكده فني و مهندسي، دانشگاه خوارزمی؛ Ghanbari@tmu.ac.ir

[iii] استاديار، پژوهشگاه بين‌المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله؛ m-davood@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

تحليل شبه‌استاتيكي، قديمي‌ترين و آسان‌ترين روش تحليل پايداري سدهاي خاكي در مقابل زلزله است كه توسط ترزاقي در سال ۱۹۵۰ بنيان‌گذاري شد و هنوز هم در طراحي سدهاي خاكي كاربرد دارد. اعمال نيروي اينرسي فرضي روش شبه‌استاتيک طبق نظر ترزاقي در مركز ثقل توده بوده است. لازمه اين فرض در نظر گرفتن شتاب ثابت اعمالي در كل توده لغزنده است [۱].

مكديسي و سيد در سال ۱۹۷۸ با انجام تحليل‌هاي ديناميكي و كنترل ميزان شتاب اعمال شده در ارتفاع سد در حوزه زمان، نشان دادند كه مقدار شتاب، با افزايش ارتفاع از پي تا تاج سد افزايش مي‌يابد. بنابراين اگر سطح لغزش فرضي به صورت دايروي در نظر گرفته شود، شتاب نقاط بالايي بيشتر است و بايد ضريب شبه‌استاتيک مورد نظر كمي بالاتر از مركز ثقل توده مستعد لغزش در نظر گرفته شود. به اين ترتيب ضريب اطمينان شبه‌استاتيكي بدست آمده با اين مطالعات، مقدار كمتري نسبت به ضرايب اطمينان بدست آمده توسط ترزاقي خواهد داشت. بنابراين براي رسيدن به نتايج صحيح‌تر، بعد از پيشنهاد ارائه شده توسط مكديسي و سيد، روش جديد، جايگزين روش ارائه شده توسط ترزاقي شد [۲].

تعيين مقدار ضريب شبه‌استاتيک، اساسي‌ترين مرحله در انجام تحليل‌هاي شبه‌استاتيكي است، بطوريكه اثر عواملي مانند بزرگي زلزله، ميزان نزديكي سازه به گسل، زاويه گسل با محور سد، نوع گسل، ويژگي‌هاي آن و مشخصات اختصاصي سد مورد مطالعه، بايد در برآورد ضريب شبه‌استاتيک ديده شوند. بنابراين ارائه پيشنهادي دقيق براي محاسبه ضريب شبه‌استاتيك با توجه به تعداد متغيرها و پيچيدگي‌هاي موجود، دشوار است. در اين خصوص مطالعات فراواني انجام شده است، اما به طور كلي دو گروه از نظرات مطرح شده درباره ضريب شبه‌استاتيكي عبارتند از:

- نظراتي كه ضريب شبه‌استاتيک را در ارتفاع سد، ثابت در نظر مي‌گيرند.
- نظراتي كه ضريب شبه‌استاتيک را در ارتفاع سد، متغير در نظر مي‌گيرند.

براي ساده‌سازي و پيشبرد روش تحليل شبه‌استاتيك با ضريب شبه‌استاتيك ثابت، چندين فرض در نظر گرفته شده است. اين فرضيات عبارتند از:

- شتاب وارد به بدنه سد در حوزه زمان ثابت است.
- نيروي معادل فقط در يك جهت اعمال مي‌شود.
- سد به عنوان يك جسم صلب در نظر گرفته مي‌شود.

در باب ضريب شبه‌استاتيكي ثابت نيز نظرات مختلفي وجود دارد كه بر مبناي تجربه و پايداري سدهايي كه تحت اثر زلزله‌هاي مختلف قرار گرفته‌اند، توسعه يافته‌اند كه از آن جمله مي‌توان به موارد زير اشاره نمود [۴،۵،۶،۷،۸،۳].

- روش ارائه شده توسط سيد در سال ۱۹۷۹
- روش ارائه شده توسط هاينز گريفين و همكاران در سال ۱۹۸۴
- روش ارائه شده توسط داكلاس و گزتاس در سال ۱۹۸۶
- روش ارائه شده توسط ياناگيساوا در سال ۱۹۹۱
- روش ارائه شده توسط ارتش ايالات متحده آمريكا در سال ۱۹۹۲
- روش ارائه شده توسط كمك‌پناه و همكاران در سال ۲۰۰۲

براي رسيدن به نتايج منطقي و نزديک به واقعيت، برخي از ضعف‌هاي عمده كه براي روش شبه‌استاتيک با ضريب شبه‌استاتيک ثابت در ارتفاع مطرح بود، اصلاح شد و رويكردهاي كامل‌تري براي بهره‌گيري از اين روش در تحليل لرزه‌اي سدهاي خاكي پيشنهاد شد. در اين نظرات رفتار سد صلب فرض نشده و با در نظر گرفتن رفتار ويسكوالاستيک و يا رفتار واقعي سد و همينطور انجام تحليل‌هاي مختلف، پيشنهادهايي براي تعيين ضريب لرزه‌اي متغير با ارتفاع ارائه شده است كه از آن جمله مي‌توان به موارد زير اشاره نمود [۱۰،۱۱،۱۲،۹]:

- روش ارائه شده توسط جاي كريشنا در سال ۱۹۶۲
- روش ارائه شده توسط سيد و مارتين در سال ۱۹۶۵
- روش ارائه شده توسط مكديسي و سيد در سال ۱۹۷۸
- روش ارائه شده در آيين‌نامه هندوستان در سال ۱۹۸۸
- روش ارائه شده توسط قنبري و همكاران در سال ۲۰۰۸

در اين مقاله براي ايجاد دقتي مناسبتر در روش پيشنهادي قنبري و همكاران، با تاكيد بر هندسه سد خاكي، تحليل‌هاي ديناميكي فراواني انجام شده و در پايان ساختار روش مورد نظر از ابعاد مختلف مورد بررسي قرار گرفته است. به همين منظور ابتدا فرضيات پايه‌اي روش و سپس فرايند مورد نظر براي رسيدن به پارامترهاي مورد نياز در روش گفته شده، براي اعمال صحيح ضريب شبه‌استاتيک، مورد كنكاش قرار گرفته است.

۲- روش جديد دقيق شده

۲-۱- فرضيات پايه‌اي:

فرضياتي كه در اين مقاله براي بيان رابطه ضريب

شبه‌استاتیک افقي مدنظر بوده است، عبارتند از:

- ضریب شبه‌استاتیک براي تحلیل سدهاي خاکي تابعي از شرایط لرزه‌خیزي ساختگاه سد و اثرات پي است. براي این منظور از عامل شتاب مبناي طرح (A) که در آیین‌نامه ۲۸۰۰ براي شهرهاي مختلف کشور معرفي شده است، استفاده شده است.
- با توجه به آنکه مطالعات عددي نشان دهنده افزایش شتاب در ارتفاع سد هستند، ضریب شبه‌استاتیک در تحلیل شبه‌استاتیک به صورت متغیر در ارتفاع فرض شده است. بر همین اساس ضریب شبه‌استاتیک در پي و بخش مدفون سد، ثابت و در ارتفاع آن به صورت خطي افزایش یافته است. گفتني است که حداکثر مقدار ضریب شبه‌استاتیک افقي در تاج سد خواهد بود.
- میزان افزایش شتاب در ارتفاع سد، تابع شرایط هندسي بدنه سد و میزان میرایي مصالح آن در نظر گرفته شده است.
- مطالعات انجام شده براي زلزله‌هاي حوزه دور کاربردي است.

۲-۲- رابطه مورد استفاده:

بر اساس فرضیات پایه‌اي بیان شده، ضریب شبه‌استاتیک براي تحلیل لرزه‌اي سدهاي خاکي به صورت تابع $K_h(Z)$ تعریف مي‌شود. اساس روش پیشنهادي قنبري و همکاران در روابط (۱) تا (۳) آورده شده است [۱۲]:

$$K_{hb} = \alpha.A \qquad (۱)$$

$$Z = \frac{y}{h} \qquad (۲)$$

$$K_h(z) = K_{hb}.(1+\beta Z) \qquad (۳)$$

در روابط ارائه شده، $K_h(Z)$ تابع ضریب شبه‌استاتیک است که بطور خطي از پي تا تاج سد افزایش مي‌یابد. نسبت افزایش شتاب در ارتفاع، تابع شرایط هندسي سد و میرایي مصالح بدنه است. هم‌چنین مقدار $K_h(Z)$ در تراز پي سد معادل ضریب شبه‌استاتیک پایه خواهد بود که مقدار آن به شرایط لرزه‌خیزي ساختگاه و اثرات پي سد وابسته است. پارامتر (A) "نسبت شتاب مبناي طرح" نام داشته و معادل حداکثر شتاب مبناي طراحي (MDE) با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله بوده و بیانگر اثرات لرزه‌خیزي ساختگاه است. در صورتي که مطالعات خاص لرزه‌خیزي انجام نشده باشد، براي مناطق مختلف ایران از آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقدار مورد نظر قابل استخراج است. (α) نسبت ضریب شتاب مبناي طرح به شتاب معادل استاتیکي است که با توجه به اثرات ساختگاه، بین مقادیر ۰/۳ تا ۰/۶ متغیر است. هم‌چنین (β) ضریبي است که اثرات هندسه سد در بزرگنمایي ضریب لرزه‌اي پایه و اثرات خواص ژئوتکنیکي مصالح بدنه سد را بیان مي‌نماید و به طور معمول بین مقادیر صفر تا ۱/۵ متغیر است. بدین ترتیب بیشترین ضریب شبه‌استاتیک در تاج، ۲/۵ برابر ضریب شتاب افقي در پایه سد است که در آیین‌نامه‌هاي مختلف مانند آیین‌نامه طراحي سدهاي خاکي کشور ژاپن نیز این مقدار برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که اینگونه افزایش شتاب در ارتفاع، براي شتاب‌هاي کم و رفتار الاستیک خطي، به طور کامل مشخص است [۱۳]. در صورتي که رفتار سد از حالت الاستیک خطي خارج شود و یا مصالح تشکیل‌دهنده بدنه سد به مرحله تسلیم برسد، نه تنها افزایش شتاب از پي تا تاج سد دیده نمي‌شود، بلکه ممکن است به کاهش مقدار شتاب نیز منجر شود. پارامتر (Z) نسبت ارتفاع مورد نظر (y) به ارتفاع کل سد (h) بوده و بیانگر مختصات نقطه مورد بررسی در ارتفاع سد است. مبدا مختصات براي پارامتر (y) روي پایه سد بوده و بنابراین براي تاج سد مقدار (Z) برابر یک است.

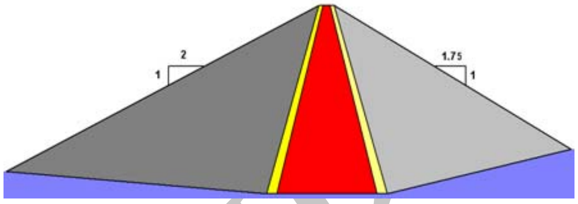
۲-۳- معرفي سد مسجد سلیمان:

در این تحقیق براي انجام تحلیل‌هاي استاتیکي، شبه‌استاتیکي و دینامیکي، همه مطالعات بر روي مدل سد مسجد سلیمان انجام شده است. سد مسجد سلیمان در استان خوزستان و در ۲۵/۵ کیلومتري شمال‌شرقي شهر مسجد سلیمان، بر روي رودخانه کارون احداث شده است. پي سد از نظر زمین‌شناسي بر روي سازندهاي بختیاري و آغاجاري که متشکل از کنگلومراي سخت با میان لایه‌هاي رسي هستند واقع شده است. حجم کل مخزن ۲۲۸ میلیون مترمکعب و حجم مفید برابر با ۲۰۰ میلیون مترمکعب است. بدنه اصلي سد به حجم ۱۳/۵ میلیون مترمکعب، ارتفاع ۱۷۷ متر از پي، طول تاج ۴۸۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، عرض سد در پي ۷۸۰ متر و حجم حفاري ۱/۸ میلیون متر مکعب است [۱۴].

۲-٤- معرفي مدل سد مسجد سلیمان:

براي مدل‌سازي سد مسجد سلیمان از مجموعه نرم‌افزاري ژئواسلوپ ورژن ۲۰۰۷ استفاده شده است. مقطع عرضي بحراني سد مسجد سلیمان بر اساس جانمایي و مقاطع ارائه شده در آلبوم نقشه‌هاي فني بدنه سد استخراج شده است. مقطع بحراني شامل ناحیه‌بندي سد، اعم از هسته، فیلترها، پوسته، ناحیه انتقالي و قسمتي از پي آبرفتي در بالادست و پایین‌دست

سد است كه در فرآيند مدل‌سازي به طور كامل در نظر گرفته شده است. در اين مقطع ارتفاع مدل از پي برابر با ۱۷۰ متر و عرض تاج معادل ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. مدل گفته شده در شكل (۱) نشان داده شده است. براي جلوگيري از ناهنجاري‌هاي ناشي از بازتاب امواج در تحليل‌هاي ديناميكي، مرزهاي مدل به اندازه كافي دور يعني ۳ برابر بيش‌ترين مقطع عرضي بدنه در راستاي افق و ۳ برابر ارتفاع سد در راستاي قائم در نظر گرفته شده است.



شكل (۱): مدل اصلي سد مسجد سليمان

البته با توجه به اهميت انتخاب ابعاد المان‌ها در انتشار صحيح امواج در محيط پيوسته، از توصيه‌هاي كوهلمير و لايزمر كه در سال ۱۹۷۳ ارائه كردند، استفاده شده است. آنها نشان دادند كه در مدل‌سازي سازه‌هاي خاكي بايد از المان‌هايي با ابعاد كوچك‌تر از $(\lambda/10)$ استفاده نمود. (λ) طول موج مربوط به بالاترين فركانس ورودي تحريك زلزله است [۱۵].

۲-۵- تحليل استاتيكي:

براي مدل‌سازي بدنه سد خاكي موردنظر در مرحله پايان ساخت از ۱۰ تا ۱۴ لايه بسته به هندسه‌هاي متفاوت در نظر گرفته شده در جدول (۱)، استفاده شده است. همچنين براي انجام تحليل‌هاي استاتيكي از مدل رفتاري موهركلمب استفاده شده است.

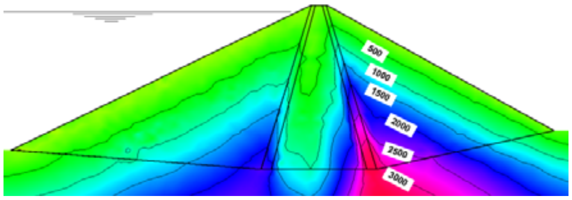
جدول (۱): مشخصات مدل‌هاي مطالعه شده از نظر هندسي

مدل	ارتفاع (متر)	شيب بالا دست	شيب پايين دست
۱	۱۷۰	۱ قائم، ۲ افقي	۱ قائم، ۱/۷۵ افقي
۲	۱۷۰	۱ قائم، ۲/٤ افقي	۱ قائم، ۲/۱۵ افقي
۳	۱۷۰	۱ قائم، ۲/۲ افقي	۱ قائم، ۱/۹۵ افقي
٤	۱۷۰	۱ قائم، ۱/۸ افقي	۱ قائم، ۱/٥٥ افقي
٥	۱۷۰	۱ قائم، ۱/٦ افقي	۱ قائم، ۱/۳٥ افقي
٦	۲٥۰	۱ قائم، ۲ افقي	۱ قائم، ۱/۷ افقي
۷	۲۱۰	۱ قائم، ۲ افقي	۱ قائم، ۱/۷٥ افقي
۸	۱۳۰	۱ قائم، ۲ افقي	۱ قائم، ۱/۷٥ افقي
۹	۹۰	۱ قائم، ۲ افقي	۱ قائم، ۱/۷٥ افقي

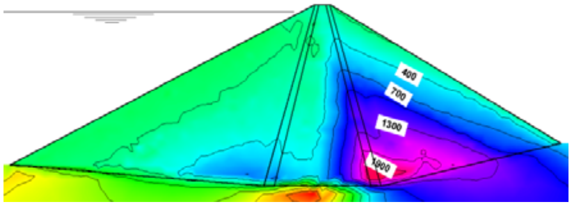
تراوش پايدار پس از برقرار شدن جريان دائمي آب ايجاد مي‌شود و در اين حالت تنش‌هاي مؤثر و فشارهاي آب حفره‌اي در مقادير حدي، ثابت مي‌شوند. براي مدل‌سازي دقيق سد مسجد سليمان در اين مرحله، تنش‌ها و جابجايي‌هاي بدست آمده از تحليل لايه‌بلايه به عنوان شرايط اوليه براي حالت تراوش پايدار در نظر گرفته شده است. همچنين سطح آب و وزن آب مخزن به مدل محاسباتي افزوده شده است. مشخصات مصالح بكار رفته در جدول (۲) آورده شده است، با اين تفاوت كه مقدار چسبندگي و زاويه اصطكاك داخلي هسته به ترتيب ٤۰ كيلو پاسكال و ۱۹ درجه است. كانتور تنش‌هاي موثر در شكل‌هاي (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول (۲): پارامترهاي استفاده شده در تحليل استاتيكي سد مسجد سليمان در مرحله پايان ساخت [۱۴]

مناطق مختلف بدنه	چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m3)	زاویه اتساع	مدول الاستیسیته (*10⁵ kPa)				
						۱۲ متر	۳۱ متر	۴۳ متر	۹۳ متر	۱۴۸ متر
هسته	۵۰	۱۰	۰/۳۴	۲۰۵۰	۰	–	۰/۳	–	۰/۷	۱/۶
پوسته بالادست	۰	۴۵	۰/۴	۲۳۵۰	۲۲	–	۰/۶۴	–	۱/۰۹	۱/۳۳
پوسته پایین دست	۰	۳۷	۰/۳۸	۲۲۰۰	۱۸	–	–	۰/۷	۱/۰۲	۱/۳
فیلتر اشباع	۰	۴۰	۰/۳۶	۲۳۵۰	۰	–	۰/۴۹	–	۰/۹۴	۱/۴۴
فیلتر مرطوب	۰	۴۰	۰/۳۶	۲۲۰۰	۰	–	۰/۷	–	۱/۰۶	۱/۵۵
فونداسیو ن	۷۰۰	۳۰	۰/۳	۲۵۰۰	–	۳/۸۷۲۲				



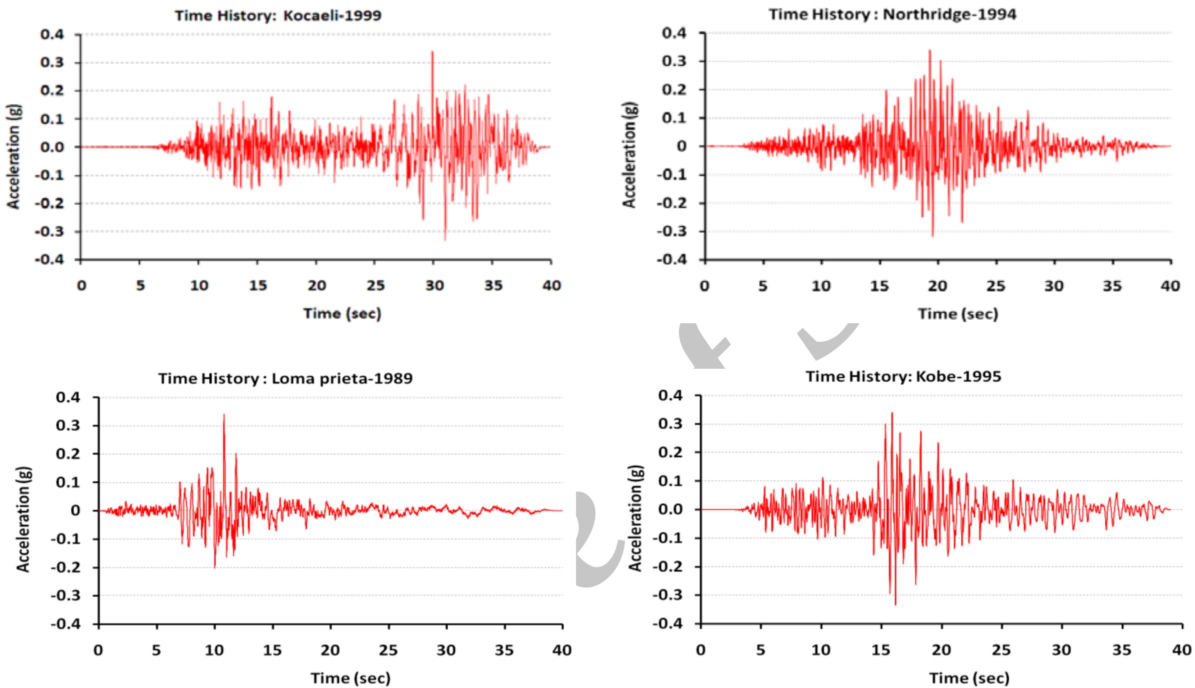
شكل (۲): كانتور تنش موثر قائم مربوط به مرحله تراوش پايدار



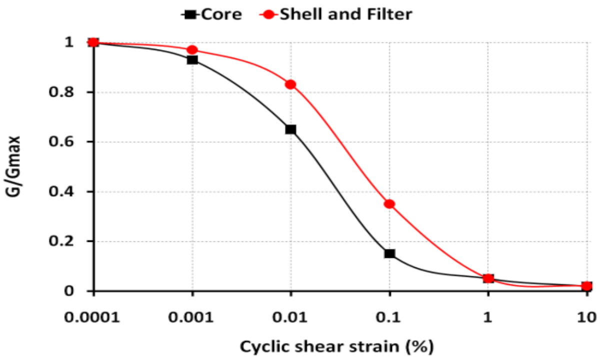
شكل (۳): كانتور تنش موثر افقي مربوط به مرحله تراوش پايدار

٢-٦- تحليل ديناميكي سد مسجد سليمان:

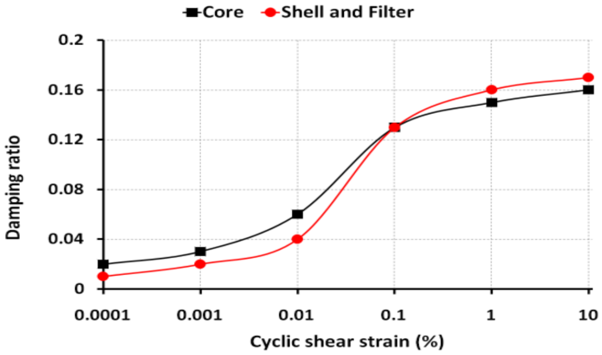
با انجام تحليل استاتيكي در حالت تراوش پايدار، زمينه براي انجام تحليل‌هاي ديناميكي فراهم شده و با استفاده از ۴ شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌هاي كوچلي در سال ۱۹۹۹، نورسريج در سال ۱۹۹۴، كوبه در سال ۱۹۹۵ و لوماپريتا در سال ۱۹۸۹، به انجام تحليل‌هاي ديناميكي پرداخته شده است. شتاب‌نگاشت‌هاي مورد استفاده در تحليل‌هاي ديناميكي در شكل (٤) ارائه شده است. در اين تحقيق تحليل‌هاي ديناميكي با استفاده از روش الاستيک خطي معادل انجام شده است. مشخصات مصالح بكار رفته در اين مرحله در جدول (۳) ارائه شده است. همچنين براي مصالح بدنه با تكيه بر گزارش‌هاي مشاور طرح، تابع كاهشي مدول برشي و تابع افزايشي نسبت ميرايي براي مصالح هسته به طور جداگانه و براي مصالح پوسته و فيلتر با توجه به تشابه رفتاري، همزمان در شكل‌هاي (۵) و (۶) ارائه شده است [۱۴].



شكل (۴): شتاب‌نگاشت‌هاي مربوط به زلزله‌هاي خاص بكار رفته در اين تحقيق



شكل (۵): نسبت مدول برشي مصالح به كرنش‌هاي برشي [۱۴]



شكل (۶): نسبت ميرايي مصالح به كرنش‌هاي برشي [۱۴]

جدول (۳): پارامترهاي استفاده شده در تحليل ديناميكي سد مسجد سليمان [۱۴]

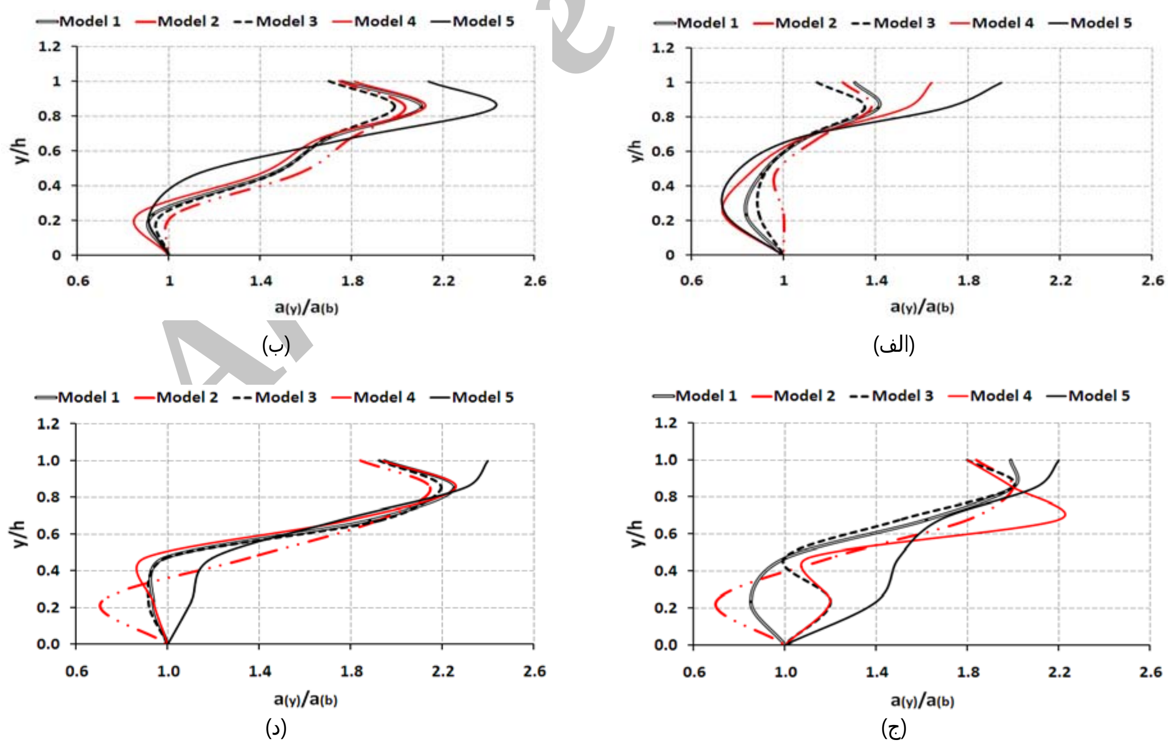
مناطق مختلف بدنه	چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m3)	زاویه اتساع	مدول الاستیسیته (*10^6 kPa)				
						۱۲ متر	۳۱ متر	۴۳ متر	۹۳ متر	۱۴۸ متر
هسته	۴۰	۱۹	۰/۴۵	۲۲۰۰	۰	–	۲/۲۳	–	۳/۸۵	۴/۲۱
پوسته بالادست	۰	۴۵	۰/۴	۲۳۵۰	۲۲	–	۲/۳۵	–	۲/۹۵	۳/۱۵
پوسته پایین دست	۰	۳۷	۰/۴	۲۲۰۰	۱۸	–	–	۳/۸	۵/۴	۵/۸
فیلتر اشباع	۰	۴۰	۰/۴	۲۳۵۰	۰	–	۱/۳۴	–	۱/۷۱	۱/۸۲
فیلتر مرطوب	۰	۴۰	۰/۴	۲۲۰۰	۰	–	۱/۷۴	–	۳/۰۷	۳/۳
فونداسیون	۷۰۰	۳۰	۰/۳	۲۵۰۰	–	۱۰/۹۲				

۲-۷- محاسبه و استخراج پارامترهاي ضريب شبه‌استاتيک:

پارامتر (β) بيانگر ميزان تشديد شتاب در ارتفاع سد بوده و به طور مستقيم از نتايج تحليل ديناميكي قابل دستيابي است. اما پارامتر (α) از تركيب تحليل ديناميكي با تحليل نيومارک بايد استخراج شود. در اين مقاله با توجه به نبود اطلاعات كافي در مورد پارامتر β و نحوه تغيير آن با تغيير هندسه بدنه سد خاكي، تمركز اصلي بر روي اين پارامتر بوده و در مورد پارامتر α پيشنهادي، با توجه به مطالعات قبلي انجام شده، فقط به بيان نحوه بدست آوردن اين پارامتر اكتفا شده است.

۲-۸- محاسبه پارامتر (β):

براي بررسي و محاسبه پارامتر (β)، بايد نحوه توزيع شتاب در ارتفاع مشخص باشد. بر اين اساس، نقطه واقع بر محور مركزي سد در هر ارتفاع را مبنا قرار داده و تغييرات شتاب در امتداد قائم در هر نقطه نسبت به نقطه مبناي واقع بر پي سد تعيين شده است. اين فرايند براي همه مدل‌ها با هندسه‌هاي متفاوت انجام شده است و نتايج بدست آمده از مدل‌هاي مختلف براي ۴ شتاب‌نگاشت اشاره شده، در شكل‌هاي (۷) و (۸) نشان داده شده است.

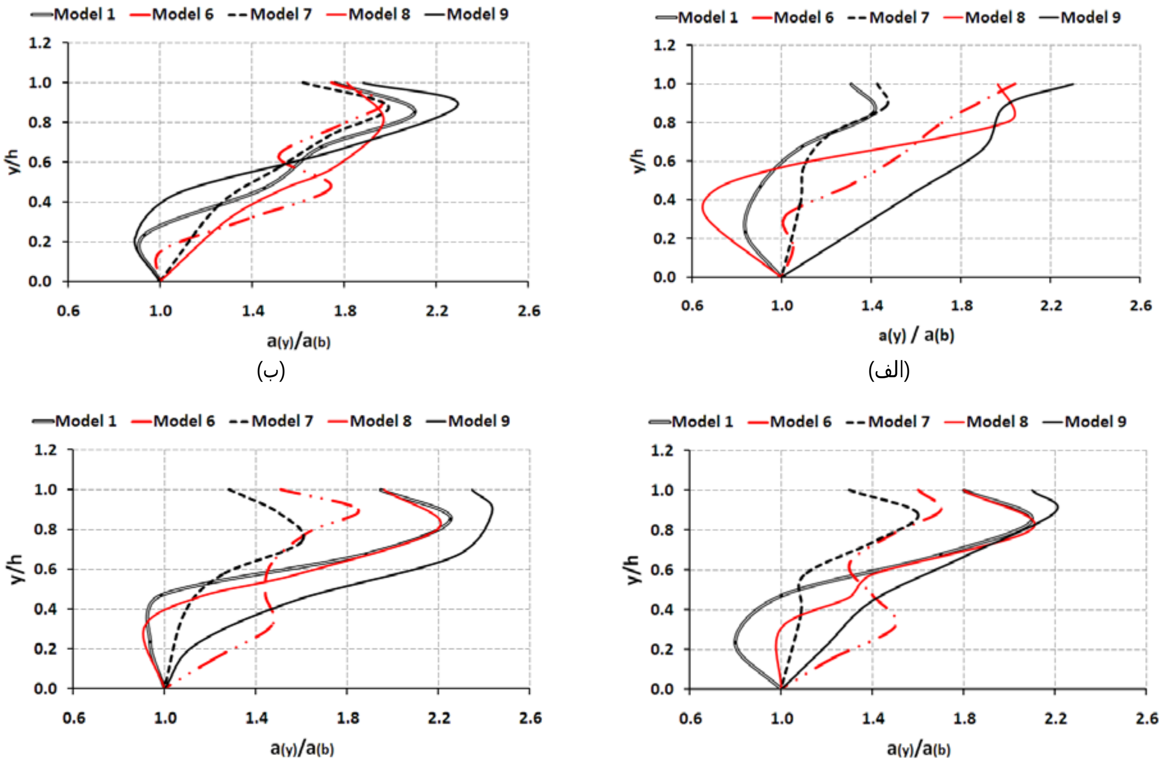


(ب) (الف)

(د) (ج)

شكل (۷): مقادير بدست آمده شتاب حداكثر در خط مياني سد براي مدل‌هاي ۱ تا ۵،

الف) كوبه در سال ۱۹۹۵ ب) كوچلي در سال ۱۹۹۹ ج) لوماپريتا در سال ۱۹۸۹ د) نورسريج در سال ۱۹۹۴



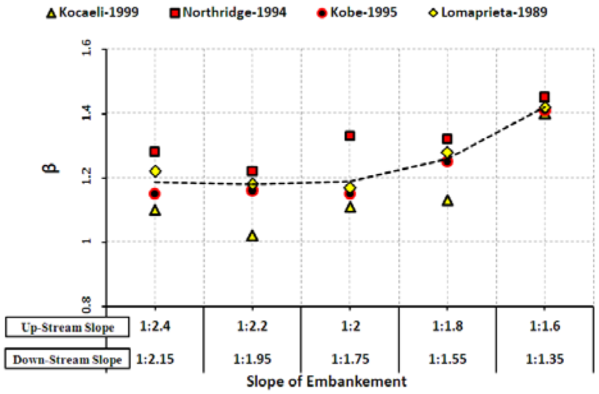
(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل (۸): مقادير بدست آمده شتاب حداکثر در خط مياني سد براي مدلهاي ۱ و ۶ تا ۹،

الف) کوبه در سال ۱۹۹۵ ب) کوچلي در سال ۱۹۹۹ ج) لوماپريتا در سال ۱۹۸۹ د) نورسريج در سال ۱۹۹۴

در پايان با توجه به تحليل‌هاي انجام شده و نتايج بدست آمده مي‌توان مقدار β پيشنهادي را براي مدل‌هاي مختلف با استفاده از شکل (۹) ارائه نمود.

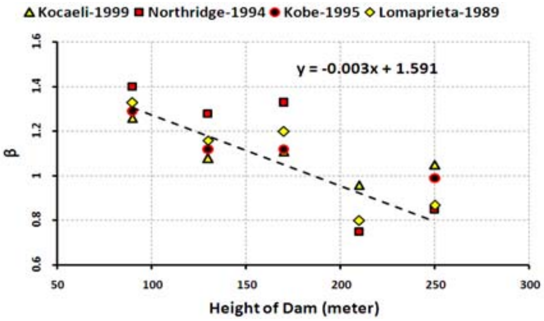


شکل (۹): نمودار پيشنهادي با در نظر گرفتن مقدار β براي تغيير شيب رخ داده براي مدلهاي با ارتفاع ۱۷۰ متر

در نمودار ارائه شده در شکل ۹، محور افقي به صورت ۲ رديف ارائه شده است که رديف اول ميزان شيب در بالادست و رديف دوم ميزان شيب در پايين‌دست را ارائه مي‌نمايد. با دقت بر منحني بدست آمده مشاهده مي‌شود که هر چه بدنه سد لاغرتر شود، مقدار β تا حد خاصي آنچنان اثر نمي‌پذيرد، اما با گذر از مرز مشخص بر مقدار پارامتر β افزوده مي‌شود. اين واقعيت بيانگر آن است که سد هر چه لاغرتر مي‌شود، به ميزان شتاب‌هاي اعمالي بر آن افزوده‌تر مي‌شود.

همچنين در مدل‌هاي شماره ۶ تا ۹ به همراه مدل اصلي، ارتفاع مورد نظر براي مدل‌ها از ۲۵۰ متر تا ۹۰ متر تغيير نموده و به اين ترتيب اثرات تغيير ارتفاع، با ۵ مدل مورد بررسي قرار گرفته است. نتايج بدست آمده در شکل (۱۰) ارائه شده است.

در مورد مقادير بدست آمده براي پارامتر β همزمان با تغيير ارتفاع، واضح است که با افزايش ارتفاع سد، شتاب اعمال شده بر آن کاهش يافته و منجربه کم شدن مقدار β شده است. اين واقعيت از آنجا ناشي مي‌شود که با افزايش ارتفاع، سد وارد مدهاي ارتعاشي بالاتر شده و به اين ترتيب کمتر تحت اثر شتاب‌هاي اعمالي از سوي زلزله قرار مي‌گيرد. البته گفتني است که انعطاف‌پذير بودن مصالح بکار رفته در سدهاي خاکي، جزء عوامل اصلي اثرگذار بر اين فرايند است.



شکل (۱۰): نحوه تغییر پارامتر β نسبت به تغییر ارتفاع مدل‌هاي محاسباتي براي شیب بالادست ۱:۲ و شیب پایین‌دست ۱: ۱/۷۵

۲-۹- محاسبه پارامتر (α):

براي بررسي پارامتر (α) لازم است که یک سري تحلیل‌هاي دینامیکي به همراه تحلیل‌هاي نیومارک انجام شود. در محاسبات مربوطه، باید مقایسه‌اي بین نتایج تحلیل‌هاي دینامیکي و شبه‌استاتیکي نیز انجام شود. به طوري که ابتدا باید ضریب اطمینان متغیر در حوزه زمان را براي بیشینه شتابي که در گوه بحراني، تغییرمکان ۳۰ سانتي‌متر طبق پیشنهاد ارائه شده توسط بري در سال ۱۹۹۷ ایجاد مي‌کند را بدست آورد [۱۶]. سپس با اعمال تابع ارائه شده در رابطه (۴) ضریب اطمینان معادل دینامیکي بدست آمده است:

$$\lambda(\bar{f}(S.F(t)_{30}))=1 \qquad (٤)$$

که در آن $(S.F(t)_{30})$، بیانگر تغییرات ضریب اطمینان در گوه بحراني با اعمال زلزله‌اي‌است که در گوه موردنظر تغییر مکان ۳۰ سانتي‌متر ایجاد نماید. در این خصوص ضریب اطمینان استاتیکي به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و ضریب اطمینان دینامیکي معادل، از تغییرات ضریب اطمینان دینامیکي در حوزه زمان، به ازاي لحظاتي که ضریب اطمینان به مقدار کمتر از ضریب اطمینان استاتیکي کاهش یافته است، مورد محاسبه واقع شده است. بدین ترتیب تابع $\bar{f}$، متوسط ضریب اطمینان‌هاي دینامیکي کمتر از مقدار استاتیکي را به عنوان ضریب اطمینان دینامیکي معادل محاسبه مي‌نماید. پس از تعیین این ضریب در تحلیل‌هاي دینامیکي، با مساوي یک قرار دادن ضریب اطمینان بدست آمده در حوزه زمان، مقدار λ بدست آمده است. سپس با اعمال مقدار λ بر ضریب اطمینان در حوزه زمان براي زلزله موردنظر در ساختگاه گفته شده، ضریب اطمینان معادل شبه‌استاتیک بدست آمده است. با مقایسه ضریب اطمینان گفته شده با ضریب اطمینان شبه‌استاتیک، ضریب شبه‌استاتیکي منجربه ایجاد ضریب اطمینان موردنظر، بدست مي‌آید. در پایان توزیع خطي ضریب شتاب افقي با توزیع ثابت این ضریب که مولد ضریب اطمینان شبه‌استاتیکي برابر با ضریب اطمینان معادل دینامیکي است، مقایسه شده و از تعادل گوه در راستاي افقي پارامتر (α) استخراج مي‌شود. هم‌چنین مقدار پارامتر (α) با تکیه بر مطالعات قبلي انجام شده، برابر با ۰/٤ بدست آمده است [۱۲].

۳- مقایسه نتایج بدست آمده

مکدیسي و سید در سال ۱۹۷۸ منحني طیف تشدید شتاب زمین در بدنه سد را بر اساس روش اجزاء محدود و آمار هشت زلزله قوي ارائه نمودند. بدین ترتیب اثر تغییر ضریب لرزه‌اي با ارتفاع مورد توجه واقع شده و هر گوه داراي یك مقدار خاص براي ضریب لرزه‌اي تحلیل شبه‌استاتیك شده است [۲].

استاندارد کشور هندوستان در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد نموده که براي کنترل لغزش سطح گسیختگي که پایین‌ترین نقطه آن در عمق (y) از تاج سد قرار دارد، ضریب شتاب افقي معادل از رابطه (۵) تعیین شود:

$$\alpha_y=(2.5-1.5\frac{y}{h})\times\alpha_h \qquad (5)$$

که در آن (h) ارتفاع سد و (α_h) مقدار ضریب لرزه‌خیزي منطقه بوده که مقادیري بین ۰/۰۳ تا ۰/۲٤ براي آن پیشنهاد شده است [۱۱].

هم‌چنین استاندارد ژاپن براي طراحي لرزه‌اي سدهاي خاکي از سال ۱۹۹۱ به بعد مورد استفاده قرار گرفت. طبق پیشنهاد این آیین‌نامه، براي بررسي پایداري مقطع اصلي، ضریب لرزه‌اي (K) براي هر گوه لغزشي یك عدد ثابت بوده و این ضریب از روابط (٦) و (٧) بدست مي‌آید:

$$0\prec\frac{y}{h}\le 0.4 \qquad K_h=K_f\times(2.5-1.85\times\frac{y}{h}) \qquad (٦)$$

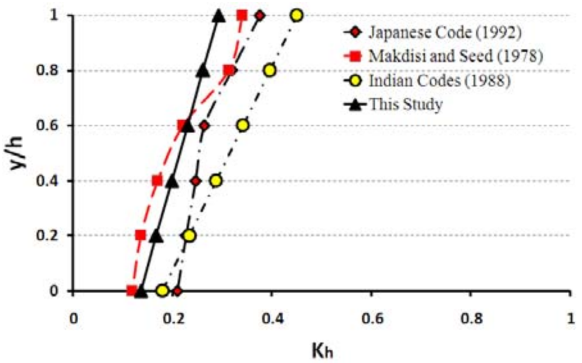
$$0.4\prec\frac{y}{h}\le 1 \qquad K_h=K_f\times(2-0.6\times\frac{y}{h}) \qquad (٧)$$

در روابط فوق (h) ارتفاع خاکریز، (y) فاصله عمودي بین تاج و انتهاي گوه لغزشي و (K_f) ضریب لرزه‌اي طراحي در پي است که براي کشور ژاپن از جدول (٤) قابل استخراج است [۱۳].

جدول (۴): ضریب (K_f) براي مناطق مختلف ژاپن [۱۳]

ضریب لرزه‌اي پي	توصیف ناحیه
۰/۱۸	مناطق با لرزه‌خیزي بالا
۰/۱٦	مناطق با لرزه‌خیزي متوسط
۰/۱۳	مناطق با لرزه‌خیزي کم

در پایان براي مقایسه نتایج بدست آمده از این روش با نتایج روش‌هاي دیگر، ۳ روش اشاره شده موردنظر واقع شده و به طور دقیق با توجه به روند گفته شده براي سایت موردنظر که در منطقه با خطر لرزه‌خیزي بالا واقع بوده، محاسبه و نتایج براي ضریب لرزه‌اي در شکل (۱۱) آورده شده است.



شکل (۱۱): مقایسه ضریب لرزه پیشنهادي با نظرات مراجع دیگر

۴- نتیجه‌گیري:

روش‌هائي که محققین قبلي براي تخمین ضریب شبه‌استاتیک سدهاي خاکي ارائه نموده‌اند، برخي از خصوصیات اساسي سد، مانند هندسه بدنه را در تعیین این ضریب موثر ندانسته‌اند. در این تحقیق با استفاده از تحلیل‌هاي بر پایه روش اجزاء محدود، اثر هندسه سد در تعیین ضریب شبه‌استاتیک بررسي و نتایج زیر به دست آمده است:

الف) با تندتر شدن شیب سد، بر مقدار β افزوده شده است. در این مورد رفتار هر ٤ شتابنگاشت اعمالي از نظر بررسي تغییرات شتاب، مشابه بوده و تفاوت آشکاري دیده نشده است. در واقع این مساله بیانگر این است که هر چه سد مورد مطالعه لاغرتر باشد، میزان شتاب‌هاي اعمالي بر آن در زمان وقوع زلزله بیشتر شده و سد بیشتر تحت اثر آن واقع مي‌شود.

ب) روند افزایش β، به ازاي شیب شیرواني بالادست کندتر از ۱ قائم به ۲ افقي متوقف شده و بطور تقریب همه شیب‌هاي کندتر از مقدار گفته شده از یک مقدار β برخوردارند.

ج) با افزایش ارتفاع سد خاکي مورد مطالعه، از میزان پارامتر β کاسته شده است.

د) نتایج حاصل از همه تحلیل‌ها نشان مي‌دهد که افزایش شتاب در ارتفاع سد تا حدود ۸۰ درصد ارتفاع، روند افزایشي داشته است و در این محدوده مي‌توان فرض خطي بودن روند افزایش شتاب را پذیرفت. با این حال در بخش بالایي سد و اطراف تاج سد کاهش محسوسي در شتاب بدنه سد دیده مي‌شود. این حالت‌ها مي‌تواند به طور کلي ناشي از تغییر در مدهاي ارتعاش براي سدهاي خاکی با ارتفاع‌هاي متفاوت باشد.

ه) مد اصلي تغییرات شتاب در ارتفاع سد براي سدهاي خاکی کوتاه در اغلب موارد منطبق بر مد اول تحریک سد است. با این حال براي سدهاي با ارتفاع بیشتر، فعال شدن مد دوم و سوم نیز دیده شد و همین عامل باعث کاهش میزان شتاب‌هاي اعمالي به سد شده بود.

و) روش شبه‌استاتیک در صورت توسعه و بهینه‌سازي روند برآورد محاسبه ضریب شبه‌استاتیک، راهکاري ساده و توانمند براي تحلیل لرزه‌اي سدهاي خاکي است.

۵- مراجع:

[۱] Terzaghi, K., "Mechanisms of landslides", In Application of Geology to Engineering Practice (Berkeley Volume), Geological Society of America, New York, 83-123, 1950.

[۲] Makdisi, F.I., Seed, H.B., "A Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deformation in Dams and Embankments", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 104, NO.GT7, P.849-867, 1978.

[۳] Seed, H.B., "Consideration in the earthquake resistant design of earth dams", Geotechnique, No 29, PP.215-263, 1979.

[۴] Hynes-Griffin, M.E., Franklin, A.G., "Rationalizing the Seismic Coefficient Method", Miscellaneous paper GL-84-13, U.S. Army Corps of Engineering Waterways Experiment Station Vicksburg, Mississippi, 1984.

[۵] Dakoulas, P., Gazetas G., "Seismic Shear Strains and Seismic Coefficients in Dams and Embankments", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, No 2, pp.75-83, 1986.

[۶] Yanagisawa, E., "Dynamic Behavior of rock fill dams, Advanced in Rock fill Structures", Neves, E.M, Kluwer Academic publishers, NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences, Vol. 200, pp. 449-470, 1991.

[۷] U.S.Army Corps of Engineers, "Engineering and Design". Earthquake Design and Evaluation for Civil Works Projects, 1995.

[۸] KomakPanah, A., Magoli, N., "Evaluation of the Horizontal Earthquake coefficient in Pseudo-Static Analysis of Slopes", Proceedings of the 3rd Conference on the Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Tehran, Iran, 2002.

[۹] Jai Krishna, "Earthquake Resistant Design of Earth Dam", Symposium on Earthquake Eng, India, 1962.

[۱۰] Seed, H.B., Martin, G.R., "The Seismic Coefficients in earth dam design", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 92 (3), pp.25–58, 1966.

[۱۱] IS 1893-1984 (Part I), "Indian Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures", (fifth Revision), 2002.

[۱۲] Ghanbari, A., Davoodi, M., Ahmadi, B., "A New Equation to Calculate The Seismic Coefficient of Pseudo-Static Analysis for The Masjed Soleiman Dam", Dam Engineering, Volume XIX, Issue 2, 2008.

[۱۳] Japan Society of Civil Engineers, "Earthquake Resistant Design Codes in Japan", 2000.

[۱۴] Davoodi, M., "Evaluating dynamic characteristics of embankment dams using ambient and forced vibration tests". PhD thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2003.

[۱۵] Kuhlemeyer, R., Lysmer, J., "Finite element method accuracy for wave propagation problems", Journal of Soil Mechanic and Foundation, Div, ASCE, 99, 421-427, 1973.

[۱۶] Bray, J.D., Rethie, E.M., Augello, A.J., Merry, S.M., "Simplified seismic designs procedure for geo synthetic lined". Soil-waste landfills, Geosynthetics International, 5 (1-2), 203-235, 1988.