

## ارائه روش المان محدود توسعه یافته برای مدل سازی پیوسته تغییر شکل سازه‌ها مطالعه موردی: سد خاکی کرخه

مرضیه جعفری\*

گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ تیر ۱۳۹۵  
بازنگری: ۱۷ بهمن ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۰ بهمن ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۲۶ بهمن ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

مدلسازی تغییر شکل سازه  
ادغام داده  
روش المان محدود  
شرایط پیوستگی بین المانی  
چارچوب مرجع لخت

**چکیده:** در این مقاله یک روش جدید کارآمد برای مدل سازی تغییر شکل سازه‌ها بر اساس روش المان محدود روی رویه سازه با در نظر گرفتن شرط پیوستگی تغییر شکل بین المان‌ها ارائه می‌شود. به عبارت دیگر روش المان محدود توسعه یافته مطرح شده با بکارگیری شرط‌های پیوستگی بین المانی به حل عددی معادلات دیفرانسیل مدل تغییر شکل می‌پردازد. همچنین این روش امکان ادغام داده‌های کنترلی سازه حاصل از سنسورهای مختلف ابزار دقیق ژئوتکنیکی و ژئودتیکی که بصورت تکراری اما غیرهمزمان جمع‌آوری شده‌اند را به عنوان مقادیر مرزی در یک چارچوب مرجع لخت میسر می‌سازد. همچنین وزن نسبی مناسب برای مشاهدات سنسورهای مختلف برآورد می‌شود. کاربرد عملی این روش مدل سازی، مطالعه تغییرات نشست رویه یک سد خاکی بر اساس ادغام مشاهدات تراز یابی ژئودتیکی و مشاهدات نشست سنسور ژئوتکنیکی و با استفاده از روش المان محدود همراه با اعمال شرط پیوستگی بین المانی می‌باشد. با توجه به RMS اختلافات بین نشست‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده از طریق مدل بر روی نقاط کنترل که تقریباً برابر با یک میلیمتر بوده و همچنین بهبود ۸۹ درصدی در صحت و ۷۳ درصد در دقت مدل، می‌توان نتیجه گرفت که مدل سازی به روش ارائه شده در این مقاله بر اساس سنسورهای چندگانه موفقیت بیشتری نسبت به مدل سازی بر اساس اطلاعات یک سنسور و همچنین ادغام اطلاعات سنسورهای چندگانه بدون اعمال شرط پیوستگی بین المانی داشته است.

### ۱- مقدمه

کنترل تغییر شکل سازه‌ها جهت حفظ سلامت آن و پیش‌بینی بروز صدمات و جلوگیری از تلفات مالی و انسانی همواره یک موضوع مهم برای دست‌انداران کنترل سلامت سازه بوده است. به خوبی واضح است که تنها بر اساس یک منبع اطلاعاتی یا اطلاعات یک سنسور نمی‌توان یک آنالیز تغییر شکل قابل اطمینان انجام داد بلکه نیاز به اطلاعات از سنسورهای مختلف است. از روش‌های قراردادی کنترل تغییر شکل سازه‌ها استفاده از مشاهدات ژئودتیکی<sup>۱</sup> و ابزار دقیق ژئوتکنیکی<sup>۲</sup> بوده است که معمولاً بصورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند بطوری که در مقالات زیادی به مطالعه آن پرداخته شده است. به عنوان مثال [۵-۱] از مطالعاتی هستند که در آن از روش‌های کینماتیک به مدلسازی تغییر شکل سازه‌ها پرداخته شده است. در برخی مقالات آنالیز تغییر شکل کینماتیک<sup>۳</sup> از طریق فیلتر کالمن<sup>۴</sup> بر اساس مشاهدات کنترل سازه معرفی شده است [۶ و ۷] و همچنین [۸] یک روش

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jafari@tafreshu.ac.ir

- 1 Geodetic
- 2 Geotechnical
- 3 kinematic
- 4 Kalman filter

مدل سازی neuro-wavelet برای پیش‌بینی دقیق رفتار سازه معرفی کرده است. از طرفی [۹] روشی برای تعیین جابجایی و کرنش سازه‌های مهندسی بر اساس مشاهدات کنترلی GPS توسعه داده است. بخاطر وجود نیروهای تأثیرگذار محیطی در تغییر شکل سازه تلاش‌هایی برای تعمیم مدل تغییر شکل وابسته به نیرو بر اساس اطلاعات کنترل سلامت سازه صورت گرفته (به عنوان مثال [۱۰ و ۱۳]) که گاهی منجر تعیین یک آستانه هشدار سریع شده است [۱۴] برای مثال تغییر شکل سدها با توجه به ارتباط بین سطح آب مخزن و مشاهدات تغییر شکل سد بر اساس سنسورهای ژئودتیکی یا GNSS مورد مطالعه قرار می‌گیرند مانند [۱۵ و ۱۶]. رفتار دینامیکی سازه بر اساس اطلاعات کنترل سلامت سازه به صورت گسترده بررسی می‌شود [۱۷]، همچنین روش‌های مختلفی برای ترکیب مدل دینامیکی با مشاهدات کنترلی سازه در جهت بهبودی دقت مدل پیش‌بینی تغییر شکل سازه بوجود آمده است به عنوان مثال [۱۸ و ۲۲]. علاوه بر سنسورهای ژئودتیکی و ژئوتکنیکی توانایی‌ها و مزایای برخی سنسورها از قبیل لیزر اسکنر و فیبر نوری در برخی تحقیقات به عنوان مثال [۲۳ و ۲۶] برای بهبود کاربرد اطلاعات کنترل تغییر شکل سازه‌ها بررسی شده‌اند.

اهمیت آنالیز تغییر شکل سازه بر اساس اندازه‌گیری‌های کنترلی از

با محدودیت (۱) عدم وجود سیستم مختصات مشترک و (۲) عدم همزمانی مشاهدات همراه است.

ابزارهای دقیق ژئوتکنیکی همزمان با ساخت سازه در داخل بدنه آن نصب می‌شوند و موقعیت آن‌ها معمولاً نسبت به محور اصلی مقاطع عرضی داده می‌شود و مشاهدات ژئوتکنیکی روی نقاط نشانه نصب شده در روی سازه انجام می‌شوند که موقعیت آن‌ها نسبت به شبکه کنترل ژئوتکنیکی بیرونی تعیین می‌شود. لذا برقرار کردن یک چارچوب مرجع لخت<sup>۲</sup> براساس نقاط ثابت با استفاده از فاکتورهای ثابت سازه به عنوان مثال سنگ بستر با جابجایی نزدیک به صفر ضروری می‌باشد. بدین ترتیب برای حل مشکل مشترک نبودن سیستم مختصات می‌بایست موقعیت هر دو نوع مشاهدات ژئوتکنیکی و ابزار دقیق به این چارچوب مرجع انتقال یابد.

با استفاده از یکی از روش‌های المان‌بندی مانند روش مثلث بندی دلونی<sup>۳</sup> المان‌های محدود سطحی بر اساس نقاط مشاهدات روی رویه سازه تشکیل می‌شود. با انتخاب زمان مبنا که می‌تواند اولین اپک<sup>۴</sup> مشاهدات کنترلی باشد، سری‌های زمانی جابجایی‌ها براساس مشاهدات تکراری ژئوتکنیکی و ابزار دقیق ساخته می‌شود که آماده برای ورود به مرحله ادغام اطلاعات می‌باشند. دو فاکتور اصلی روش توسعه یافته در مدل‌سازی پیوسته تغییرشکل سازه در این مقاله اولاً مدل ریاضی است که مشاهدات را به پارامترهای تغییرشکل مجهول مرتبط می‌کند ثانیاً الگوریتمی که اجازه می‌دهد مجهولات از طریق یک روش کمترین مربعات تکراری براساس المان‌های محدود با در نظر گرفتن شروط پیوستگی تغییرشکل بین المان‌ها استخراج شود و همچنین در این پروسه وزندهی مشاهدات تکرار خواهد شد تا در نهایت وزن مناسب هر دسته از مشاهدات بدست آید [۲۷ و ۲۸].

برای ارائه مدل ریاضی تغییرشکل هر المان با معرفی بردار جابجایی سه بعدی  $u(x, y, z, t), v(x, y, z, t), w(x, y, z, t)$  هر نقطه بعد از خطی‌سازی از طریق بسط سری تیلور شروع می‌کنیم که با پارامترهای تغییرشکل  $(u_x = \partial u / \partial x, v_y = \partial v / \partial y, w_z = \partial w / \partial z, u_y = \partial u / \partial y, v_x = \partial v / \partial x, w_y = \partial w / \partial y, u_z = \partial u / \partial z, v_z = \partial v / \partial z, w_x = \partial w / \partial x)$  و مشتقات اول زمانی آن‌ها بصورت زیر مرتبط می‌شود:

$$\mathbf{d} := \begin{bmatrix} u(x, y, z, \mathbf{t}) \\ v(x, y, z, \mathbf{t}) \\ w(x, y, z, \mathbf{t}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_x + \dot{u}_x dt)\Delta x + (u_y + \dot{u}_y dt)\Delta y + (u_z + \dot{u}_z dt)\Delta z \\ (v_x + \dot{v}_x dt)\Delta x + (v_y + \dot{v}_y dt)\Delta y + (v_z + \dot{v}_z dt)\Delta z \\ (w_x + \dot{w}_x dt)\Delta x + (w_y + \dot{w}_y dt)\Delta y + (w_z + \dot{w}_z dt)\Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} f_x(\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt; \mathbf{x}) \\ f_y(\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt; \mathbf{x}) \\ f_z(\Delta x, \Delta y, \Delta z, dt; \mathbf{x}) \end{bmatrix}$$

- 2 Initial reference frame
- 3 Delaunay
- 4 Epoch

مقالات بیشماری که در این زمینه ارائه شده مشخص است بنابراین در نبود اندازه‌گیری‌های نیروهای مؤثر یا عدم دقت در اندازه‌گیری‌های آن‌ها، آنالیز کینماتیک تغییرشکل سازه ارجحیت دارد. در این مقاله رفتار کینماتیک سازه‌ها پس از ساخت سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نتیجه روش جدیدی برای مدل‌سازی تغییرشکل آن‌ها ارائه می‌شود. روش ارائه شده در این مقاله براساس یک توسعه‌ی جدید در روش المان محدود جهت مدل‌سازی تغییرشکل رویه سازه است. برخلاف سایر تحقیقات گذشته در رابطه با مدل‌سازی تغییرشکل کینماتیک براساس المان‌های محدود که معادلات المان‌ها بصورت مستقل در نظر گرفته می‌شوند، برای مطالعه‌ی تغییرشکل رویه سازه بصورت پیوسته دستگاه معادلات هر المان با اضافه کردن قیود پیوستگی تغییرشکل بین المانی غنی شده‌اند. به عبارت دیگر یک روش المان محدود سطحی توسعه یافته (ESFEM) جهت مدل‌سازی تغییرشکل رویه سازه ارائه شده و در نتیجه دستگاه معادلات تمام المان‌ها باید همزمان باهم حل شوند.

از طرفی اکثر سیستم‌های کنترل قابل اطمینان برای سازه‌ها بر اساس ادغام اطلاعات سنسورهای مختلف ایجاد شده‌اند. جایگزین کردن سنسورهای با کیفیت پایینتر با تراکم مکانی بالا به جای یک تعداد کم سنسور با کیفیت بالا، خواص مختلفی از سیستم را آشکار می‌کند که یکی از مزایای اصلی این روش ادغام اطلاعات سنسورهای چندگانه است [۲۷ و ۲۸]. بنابراین جهت توسعه‌ی یک روش مدل‌سازی تغییرشکل که بتواند با اطمینان کامل جایگزین سیستم قراردادی کنترل سازه‌ها شود، در این مقاله روش مطالعه تغییرشکل براساس ادغام دو منبع اصلی اطلاعات کنترل سازه یعنی ژئوتکنیکی و ابزارهای دقیق ژئوتکنیکی انجام می‌شود.

با این مقدمه در بخش بعدی قصد داریم به معرفی روش پیشنهادی این مقاله برای مطالعه تغییرشکل سازه‌ها بپردازیم. بخش ۳ به کاربرد روش ارائه شده برای مطالعه تغییرشکل سد خاکی کرخه به عنوان مطالعه موردی اختصاص دارد. سرانجام نتیجه‌گیری و بحث در بخش ۴ ارائه خواهد شد.

## ۲- روش المان محدود توسعه یافته برای مدل‌سازی پیوسته تغییرشکل سازه‌ها

هدف این مقاله مطالعه تغییرشکل سازه‌ها براساس ادغام مشاهدات ژئوتکنیکی و ابزار دقیق با استفاده از روش المان محدود با تکیه بر موقعیت مشاهدات کنترلی سازه است. از آنجایی که مشاهدات ژئوتکنیکی محصور به رویه سازه (بدون در نظر گرفتن گالری‌ها) و مشاهدات ابزار دقیق با توجه به ذات آن‌ها محدود به درون سازه هستند، بنابراین مطالعه تغییرشکل سه‌بعدی سازه براساس المان‌های حجمی منجر به تشکیل المان‌های بزرگ با گستردگی زیاد و ناهمگن مصالح ساختمانی خواهد شد. با این وجود در اینجا هدف تشکیل المان‌های سطحی روی رویه سازه یا در صفحه مقاطع عرضی و در نتیجه مطالعه تغییرشکل رویه سازه است. در تکنیک ادغام داده می‌توان مزیت هر دو نوع مشاهدات ژئوتکنیکی و ابزار دقیق را استفاده کرد که

- 1 Extended Surface Finite Element Method

شرح زیر در نظر می‌گیریم:

(الف) المان مثلثی شماره یک با سه نقطه گرهی شماره ۱، ۲ و ۳ شامل مشاهدات جابجایی سه بعدی  $(u, v, w)$

(ب) المان مثلثی شماره دو با سه نقطه گرهی شماره ۱، ۲ و ۴ شامل مشاهدات جابجایی سه بعدی  $(u, v, w)$  که در نقطه گرهی شماره ۱ و ۲ با المان شماره یک مشترک است.

دستگاه معادلات اولین المان براساس سه معادله مشاهده از نوع رابطه ۳ در سه نقطه گرهی آن تشکیل میشود. دستگاه معادلات دومین المان مثلثی دارای دو نقطه گرهی مشترک با المان اول، فقط شامل یک معادله مشاهده مستقل در نقطه گرهی شماره ۴ است و در دو نقطه گرهی مشترک باید قیود پیوستگی مدل تغییرشکل نوشته شود. قیود پیوستگی به گونه‌ای است که جابجایی حاصل از مدل تغییرشکل المان اول و المان دوم در این نقاط باهم مساوی قرار داده می‌شود. دستگاه معادلات المان مثلثی اول و دوم به ترتیب بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\{ \mathbf{d}_j = \mathbf{A}_j \mathbf{x}^{(1)} \quad j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_x(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, dt; \mathbf{x}^{(1)}) = f_x(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, dt; \mathbf{x}^{(2)}) \\ f_y(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, dt; \mathbf{x}^{(1)}) = f_y(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, dt; \mathbf{x}^{(2)}) \\ f_z(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, dt; \mathbf{x}^{(1)}) = f_z(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, dt; \mathbf{x}^{(2)}) \end{cases} \quad j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$\mathbf{d}_4 = \mathbf{A}_4 \mathbf{x}^{(2)}$$

به طوری که  $\mathbf{x}^{(1)}$  و  $\mathbf{x}^{(2)}$  به ترتیب پارامترهای مجهول المان‌های مثلثی اول و دوم از نوع رابطه ۲ هستند. با توجه به روش پیشنهادی این مقاله لازم است که دستگاه معادلات تمام المان‌ها بصورت یکجا در یک پروسه سرشکنی کمترین مربعات همراه با قیود وزن‌دار حل شوند تا بردار باقیمانده‌ها و وزن مناسب منحصر بفرق برای هر دسته از مشاهدات در نقاط گرهی المان‌ها برآورد شود. بنابراین دستگاه معادلات رابطه ۶ و ۷ بصورت زیر قابل نمایش است:

$$\begin{cases} \mathbf{d}_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{total}, \quad \mathbf{C}_i = \sigma_i^2 \mathbf{P}_i^{-1} \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ \mathbf{1}_c + \mathbf{v}_c = \mathbf{D} \mathbf{x}_{total}, \quad \mathbf{C}_c = \sigma_c^2 \mathbf{P}_c^{-1}, \quad \mathbf{1}_c = \mathbf{0} \end{cases} \quad (8)$$

در صورتی که قیود را مانند یک دسته مشاهده وزن‌دار در نظر بگیریم بردار  $\mathbf{d}_i$  و  $\mathbf{1}_c$  به ترتیب معرف بردار مشاهدات جابجایی و قیود پیوستگی،  $\mathbf{v}_i$  و  $\mathbf{v}_c$  بردار باقیمانده آنها است.  $\mathbf{P}_i$  و  $\mathbf{P}_c$  به ترتیب ماتریس وزن معین و معلوم مشاهدات جابجایی و قیود پیوستگی که با فاکتور واریانس  $\sigma_i^2$  و  $\sigma_c^2$  با ماتریس‌های واریانس - کواریانس  $\mathbf{C}_i$  و  $\mathbf{C}_c$  مرتبط می‌شوند. همچنین در این رابطه  $\mathbf{x}_{total}$  شامل مجموعه پارامترهای مجهول به ترتیب المان مثلثی اول و دوم است و ماتریس قیود  $\mathbf{D}$  که شامل تمام قیود پیوستگی تعریف شده روی المان‌ها است و بصورت زیر تعریف می‌شود:

که در این رابطه  $u_0 = u(x_0, y_0, z_0), \Delta z = (z - z_0), \Delta y = (y - y_0), \Delta x = (x - x_0), v_0 = v(x_0, y_0, z_0), w_0 = w(x_0, y_0, z_0), f_x, f_y, f_z$  مولفه‌های مدل تغییرشکل هستند. اگر مدل تغییرشکل با استفاده از مشتقات درجه بالاتر نوشته شود مدلی دقیق‌تر بدست آمده اما تعداد مجهولات افزایش می‌یابد. از آنجایی که  $\mathbf{t} = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_n]^T$  می‌تواند هر بردار زمانی با هر فاصله زمانی باشد، بنابراین بردار  $\mathbf{d}$  که طبق رابطه ۱ تابعی از زمان است می‌تواند شامل سری زمانی مشاهدات غیر همزمان باشد. پس بنابراین ساختار این بردار کمک به حل مشکل عدم همزمانی مشاهدات سنسورهای مختلف برای ورود به پروسه ادغام مشاهدات می‌کند.  $\mathbf{d}t$  زمان سپری شده از زمان مبنا است. با تعریف بردار  $\mathbf{X}$  بصورت زیر:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z & \dot{u}_x & \dot{u}_y & \dot{u}_z & v_x & v_y & v_z & \dots \\ \dot{v}_x & \dot{v}_y & \dot{v}_z & w_x & w_y & w_z & \dot{w}_x & \dot{w}_y & \dot{w}_z & \dots \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

رابطه ۱ را میتوان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\mathbf{d} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (3)$$

که ماتریس طرح بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0}_{n \times 6} & \mathbf{0}_{n \times 6} \\ \mathbf{0}_{n \times 6} & \mathbf{R} & \mathbf{0}_{n \times 6} \\ \mathbf{0}_{n \times 6} & \mathbf{0}_{n \times 6} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (4)$$

در این رابطه با معرفی  $\mathbf{J}$  به عنوان ماتریس یک  $\mathbf{R}^{-1}$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{R} = [\Delta x \mathbf{J}_{n \times 1} \quad \Delta x dt \quad \Delta y \mathbf{J}_{n \times 1} \quad \Delta y dt \quad \Delta z \mathbf{J}_{n \times 1} \quad \Delta z dt] \quad (5)$$

در صورت وجود ترک در بدنه سازه تغییرشکل آن بصورت ناپیوسته است در غیر این صورت در نظر گرفتن شرط پیوستگی در ایجاد یک مدل تغییرشکل روی رویه سازه ضروری است. دستگاه معادلات تعریف شده قبلی به تنهایی برای تخمین مدل تغییرشکل سازه بصورت پیوسته کافی نیست و مدل تغییرشکل هر المان به طور مستقل از المان‌های مجاور تخمین زده می‌شود به طوری که برای یک مشاهده مشترک بین المان‌ها به دلیل تکرار معادله مشاهده، باقیمانده‌های مختلفی بدست می‌آید. بنابراین در این مقاله پیشنهاد می‌شود که قیود پیوستگی تغییرشکل بین المانی به دستگاه معادلات المان‌ها اضافه شود و سپس دستگاه معادلات تمام المان‌ها همراه با قیود پیوستگی در یک پروسه کمترین مربعات بصورت یکجا حل شوند. این روش یک روش توسعه یافته در روش المان محدود سطحی (ESFEM) برای مدل‌سازی تغییرشکل رویه سازه بصورت پیوسته است.

برای تعریف قیود پیوستگی به طور نمونه دو المان مثلثی هم‌جوار را به

$$P_{1_{e,j}} = \frac{1}{\hat{\sigma}_{1_{e,j}}^2} P_{1_{e,j-1}} \quad (۱۶)$$

روند محاسبات از رابطه ۱۰ تا رابطه ۱۶ باید تا جایی تکرار شود که فاکتور واریانس نزدیک به یک شده همگرایی رخ دهد. بر این اساس مدل تغییرشکل رویه سازه از طریق روش المان محدود توسعه یافته و همچنین ادغام اطلاعات سنسورهای چندگانه همراه با وزن نسبی مشاهدات جابجایی بکار رفته در مدل سازی برآورد می شود که می تواند در پیش بینی رفتار سازه در بلند مدت مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳- مطالعه نشست سد خاکی کرخه

در مطالعه تغییرشکل سدهای خاکی با محدود کردن تغییرشکل به مؤلفه قائم جابجایی، مشاهدات ژئودتیکی و ابزار دقیق ژئوتکنیکی به ترتیب از نوع ترازیبی و نشست سنجی می تواند مناسب باشد. بخشی از داده های کنترل تغییرشکل سد خاکی کرخه که شامل مشاهدات صفحات نشست سنجی ژئوتکنیکی در بازه زمانی جولای ۱۹۹۷ تا مارس ۲۰۰۹ و داده های ترازیبی ژئودتیکی در بازه زمانی فوریه ۲۰۰۰ تا ژوئن ۲۰۰۶ است جهت پیاده سازی روش مدل سازی ارائه شده در این مقاله برای مطالعه تغییرشکل سد مورد استفاده قرار می گیرد و نتایج عددی حاصل ارائه خواهد شد. میانگین دقت برآورد شده برای مشاهدات ترازیبی نقاط روی بدنه سد ۸ میلی متر و میانگین انحراف معیار برآورد شده از سری زمانی مشاهدات صفحات نشست سنجی ژئوتکنیکی ۴ میلی متر است.

سد کرخه بزرگترین سد خاکی در تاریخ ایران است. این سد از نوع خاکی با هسته رسی مخلوط می باشد که ارتفاع از پی<sup>۲</sup> این سد ۱۲۸ متر و طول محور سد<sup>۳</sup> ۳۰۳۰ متر است. حجم مخزن<sup>۴</sup> حدود ۷ میلیارد متر مکعب و ظرفیت نیروگاه<sup>۵</sup> ۴۰۰ مگاوات می باشد.

مطابق روش ارائه شده، پیش از شروع ادغام اطلاعات این مراحل باید دنبال شود: (۱) انتخاب یک زمان مبنا برای بدست آوردن جابجایی نقاط سد، (۲) تعریف یک سطح مبنا به عنوان چارچوب مرجع لخت خارج سد و (۳) انتقال مختصات ایستگاه های مشاهدات ژئودتیکی و ابزار دقیق به چارچوب مرجع تعریف شده.

در این مطالعه اولین دوره مشاهدات ژئودتیکی به عنوان زمان مبنا انتخاب شده و سطح مبنا روی سنگ بستر با جابجایی صفر قرار داده شده است. موقعیت نشست سنج ها در محدوده هر مقطع عرضی با یک فاصله از محور اصلی آن ارائه می شود و موقعیت محور اصلی این مقطع عرضی در سیستم مختصات<sup>۶</sup> UTM تعریف شده است که کمک به ارتباط موقعیت

$$D = \begin{bmatrix} \text{diag}(R_1) & \text{diag}(-R_1) \\ \text{diag}(R_3) & \text{diag}(-R_3) \end{bmatrix} \quad (۹)$$

عبارت  $\text{diag}(\cdot)$  به معنی تشکیل یک ماتریس قطری است که عبارت داخل پرانتز روی قطر اصلی آن قرار می گیرد.  $R_1$  نیز ماتریسی است که طبق رابطه ۵ برای هر نقطه گرهی تعریف می شود.

پروژه برآورد بردار  $X_{\text{total}}$ . اگر تنها بر اساس معادلات ردیف اول دستگاه معادلات رابطه ۸ باشد منجر به یک مسئله سینگولار می شود زیرا ماتریس طرح تجمعی<sup>۱</sup> حاصل از تمام ماتریس های طرح  $A_i$  با کمبود رتبه مواجه است، بنابراین ماتریس قیود برای جبران این کمبود رتبه لازم است. برای مشاهدات از سنسورهای یکسان می توان یک ماتریس طرح تجمعی بطور مستقل ایجاد نمود که در نتیجه ارزشی یکسان برای مولفه ی واریانس این نوع مشاهده تخمین زده می شود. حل دستگاه معادلات رابطه ۸ با استفاده از سرشکنی کمترین مربعات مشاهدات جابجایی همراه با قیود وزندار برای برآورد مجهولات تغییرشکل المان ها طبق روابط زیر صورت می گیرد:

$$\hat{x}_{\text{total}} = N^{-1}u \quad (۱۰)$$

$$N = (A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_2 A_2 + A_3^T P_3 A_3 + A_4^T P_4 A_4 + D^T P_c D) \quad (۱۱)$$

$$u = (A_1^T P_1 d_1 + A_2^T P_2 d_2 + A_3^T P_3 d_3 + A_4^T P_4 d_4 + D^T P_c d_c) \quad (۱۲)$$

در یک عملیات ادغام، تصحیح وزن مشاهدات با برآورد تکراری فاکتور واریانس  $\hat{\sigma}_{i,j}^2 = \hat{v}_{i,j-1}^T P_{i,j-1} \hat{v}_{i,j-1} / r_i$  برای هر نقطه گرهی شروع می شود که  $j = 1, 2, \dots, p$  تعداد تکرارها را نشان میدهد.  $\hat{v}_{i,j-1}$  باقیمانده برآورد شده مشاهدات در تکرار  $j-1$  و  $r_i$  معرف عدد آزادی است که بصورت زیر تعریف می شود:

$$r_i = n_i - \text{tr}(A_{i,j-1}^T P_{i,j-1} A_{i,j-1} N_{j-1}^{-1}) \quad (۱۳)$$

همچنین  $\hat{\sigma}_{1_{e,j}}^2 = \hat{v}_{1_{e,j-1}}^T P_{1_{e,j-1}} \hat{v}_{1_{e,j-1}} / r_{1_e}$  برآورد فاکتور واریانس قیود است که در آن  $\hat{v}_{1_{e,j-1}}$  باقیمانده برآورد شده و  $r_{1_e}$  عدد آزادی است که به صورت زیر برآورد می شود:

$$r_{1_e} = n_{1_e} - \text{tr}(D_{j-1}^T P_{1_{e,j-1}} D_{j-1} N_{j-1}^{-1}) \quad (۱۴)$$

پس از استخراج فاکتور واریانس ها ماتریس وزن مشاهدات به صورت زیر بهبود داده می شود:

$$P_{i,j} = \frac{1}{\hat{\sigma}_{i,j}^2} P_{i,j-1} \quad (۱۵)$$

- 2 Height from foundation
- 3 Crest length
- 4 Total volume of reservoir
- 5 Power plant capacity
- 6 Universal Transverse Mercator

- 1 Accumulated design matrix

می‌تواند مشخص کند که آیا سد به پایداری نهایی رسیده است یا نه و چگونه به وضعیت پایداری نهایی نزدیک می‌شود. وضعیت پایداری سد با توجه به شتاب‌نمایی تغییرشکل‌ها رخ می‌دهد به اینگونه که اگر شتاب تغییرشکل‌ها به صفر نزدیک شوند به معنی پایداری تغییرشکل‌ها است. روش این تحقیق برای مطالعه نشست سد خاکی کرخه که از طریق برنامه‌نویسی در محیط متلب روی داده‌های این سد پیاده‌سازی شده را می‌توان بصورت فلوجارت شکل ۲ خلاصه کرد:

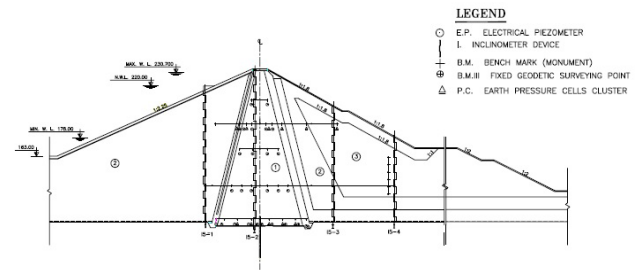


شکل ۲: فلوجارت روش مدل‌سازی تغییرشکل سد بر اساس ادغام مشاهدات سنسورهای ژئودتیکی و ابزار دقیق

Fig. 2. Flowchart of deformation modeling method of dam based on the fusion of the geodetic and precise instrument data

برای ارزیابی مدل بدست آمده از روش پیشنهادی این مقاله از داده‌های نشست ابزار دقیق که در بدست آوردن مدل تغییرشکل دخیل نبوده‌اند به عنوان داده تست بهره گرفته شده است. نتایج مقایسه نشست‌های محاسبه شده در نقاط کنترل و نشست‌های مشاهده شده، در جدول ۱ خلاصه شده است. در این مقاله هم‌چنین روش مدلسازی به روش المان محدود بدون در نظر گرفتن شروط پیوستگی بین المانی نیز پیاده‌سازی شده و نتایج آماری حاصل در جدول ۱ ارائه شده و با روش مدل‌سازی پیشنهادی با در نظر گرفتن شروط پیوستگی بین المانی مقایسه شده است. علاوه بر این جهت

بین دو سنسور با سیستم مختصات متفاوت خواهد کرد. بنابراین تبدیل موقعیت نقاط نشانه ترازیبی ژئودتیکی و نشست‌سنج‌ها داخل چارچوب مرجع براساس اطلاعات بالا انجام می‌شود. سری‌های زمانی نشست رویه سد، از تفریق مشاهدات ترازیبی ژئودتیکی از مشاهده ترازیبی زمان مبنا بدست می‌آید که ورودی پروسه ادغام است.



شکل ۱: نقشه ابزاربندی مقطع عرضی ۵-۵ (St: 1+230)

Fig. 1. Instrumentation Map of Cross-Section 5-5

برای ارائه مدلی جامع برای نشست رویه سد ابتدا رویه را با استفاده از روش مثلث‌بندی دلونی دو بعدی، المان‌بندی می‌کنیم بطوری که نقاط گرهایی آن موقعیت سنسورهای چندگانه نسبت به چارچوب مرجع باشد. سپس برای هر المان سطحی یک مدل نشست مطابق رابطه ۱، نوشته می‌شود. از آنجایی که در برخورد با مطالعه یک سد خاکی با جابجایی بسیار کوچک افقی نسبت به جابجایی قائم مواجه هستیم و هم‌چنین برای انجام این مطالعه تنها مشاهدات در دسترس از نوع تغییرشکل قائم می‌باشد پس بنابراین فقط مؤلفه سوم رابطه ۱ به علاوه تعدادی از مشتقات زمانی مؤلفه قائم برای مدل‌سازی تغییرشکل سد خاکی در نظر گرفته شده و مدل به این صورت ارائه می‌شود:

$$w = (w_x + \dot{w}_x dt)\Delta x + (w_y + \dot{w}_y dt)\Delta y + (w_z + \dot{w}_z dt + \ddot{w}_z dt^2 + \ddot{\ddot{w}}_z dt^3)\Delta z \quad (17)$$

ماتریس وزن اولیه  $P_i = \sigma_i^2 C_i^{-1}$  با در نظر گرفتن یک مقدار اولیه دلخواه برای فاکتور واریانس  $\sigma_i^2$  برای انواع مشاهدات حاصل شده در حالی که یک ماتریس قطری متشکل از واریانس‌های داده شده مشاهدات ژئودتیکی و ابزار دقیق است. وزن قیود نیز یکسان در نظر گرفته می‌شود بنابراین می‌توان ماتریس وزن اولیه را  $P_i = I$  در نظر گرفت تا در طول پروسه کمترین مربعات دوباره وزن دهی شود.

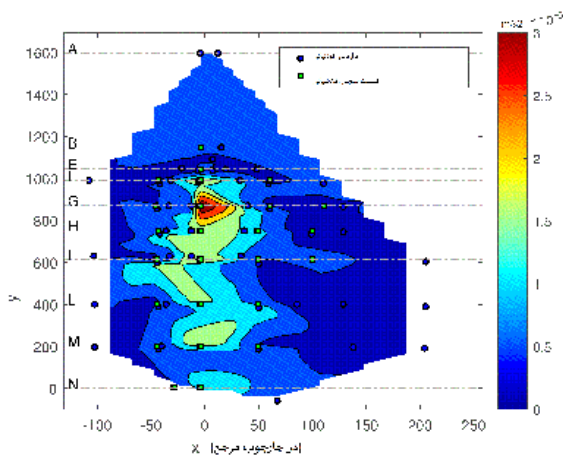
پس از محاسبه پارامترهای مدل نشست (W) رویه سد در داخل المان‌های مثلثی طبق روابط ریاضی فصل قبل، یک شبکه منظم بر روی رویه سد ایجاد می‌شود و نشست‌های حاصل از مدل‌سازی بر اساس ادغام اطلاعات سنسورهای مختلف روی نقاط شبکه منظم محاسبه و منحنی میزان نشست رویه سد ارائه می‌شود. گام آخر به بحث در مورد نشست‌های رویه سد حاصل از مدل پرداخته می‌شود به اینصورت که روش مذکور

**جدول ۱: خلاصه نتایج آماری حاصل از مقایسه مدل نشست سطحی با داده‌های نشست که در مدل‌سازی استفاده نشده**

Table 1. The statistical results of difference between modelled settlement and observed settlement

اختلاف بین داده تست و مدل پیشبینی			داده استفاده شده در مدلسازی
RMS (mm)	STD (mm)	Mean (mm)	
۳/۸	۱/۶	-۱/۴	مشاهدات ابزار دقیق
۱/۴	۱/۳	-۰/۴	ادغام مشاهدات ژئودتیکی و ابزار دقیق (بدون قید پیوستگی)
۱/۰	۰/۹	-۰/۲	ادغام مشاهدات ژئودتیکی و ابزار دقیق (همراه با قید پیوستگی)

با توجه به نتایج آماری ارائه شده فوق از مقایسه روش‌های مدل‌سازی ملاحظه می‌شود که اولاً ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق به نفع مدل‌سازی تغییرشکل در مقایسه با بکارگیری اطلاعات ابزار دقیق تنها بوده است، دوماً مدل‌سازی بر اساس روش دوم با در نظر گرفتن شرط پیوستگی درصد بهبود بیشتری در صحت و دقت مدل پیشبینی نشست‌های رویه سد ایجاد کرده است. همچنین برای بررسی وضعیت تعادل نهایی تغییرشکل‌های سد نمودار منحنی میزان شتاب نشست رویه سد بعد از ۳ ماه و بعد از ۷۶ ماه از زمان مبنا در و نمایش داده می‌شود.



شکل ۳: شتاب مدلسازی شده نشست رویه سد بر اساس ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق بعد از گذشت ۳ ماه از زمان مبنا

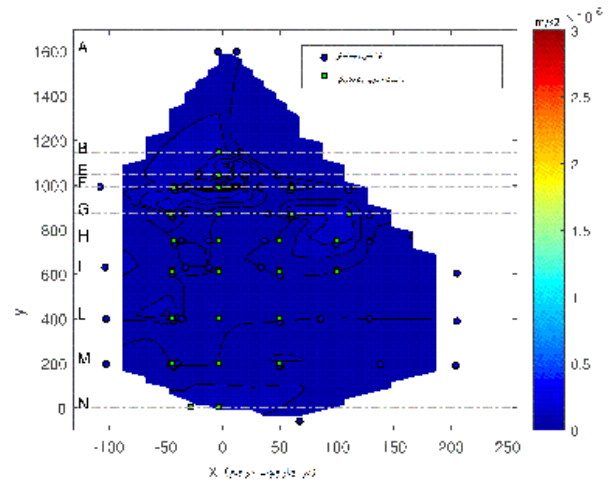
Fig. 3. The modeled settlement of dam surface based on the fusion of the geodetic and precise instrument data after passing 3 months since reference time

صحت‌سنجی روش پیشنهادی و همچنین بررسی توان آن از طریق ادغام مشاهدات سنسورهای مختلف، نتایج مدل‌سازی با نتایج مشابه حاصل از بکارگیری تنها مشاهدات ابزار دقیق نیز در جدول ۱ مقایسه شده است. با توجه به نتایج آماری ارائه شده در این جدول و پارامترهای آماری محاسبه شده، مدل‌های حاصل از ادغام در هر دو حالت نتایج دقیق‌تری را در مقایسه با مدل حاصل از داده‌های نشست ابزار دقیق تنها حاصل نموده است. به عنوان مثال، میانگین اختلاف بین نشست مدل‌سازی شده بر اساس ادغام و مشاهدات نشست در ۲۲۹ نقطه کنترل (۰/۴- میلی‌متر) می‌باشد. در حالی که اختلاف بین نشست‌های مدل‌سازی شده بر اساس داده ابزار دقیق تنها (بدون ادغام داده) و مشاهدات نشست در نقاط کنترل (۱/۴- متر) بوده است. این مقادیر بهبود حدود ۷۱٪ در صحت مدل نشست حاصل از ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق را در مقایسه با مدل حاصل از داده‌های ابزار دقیق تنها نشان می‌دهند. همین نتایج از پارامترهای STD و RMS نیز بدست می‌آید. به عنوان مثال، STD و RMS اختلاف بین نشست مدل‌سازی شده بر اساس ادغام و مشاهدات نشست در نقاط کنترل به ترتیب ۱/۳ (میلی‌متر) و ۱/۴ (میلی‌متر)، می‌باشد. در حالی که STD و RMS محاسبه شده برای اختلاف بین نشست‌های مدل‌سازی شده بر اساس داده ابزار دقیق تنها (بدون ادغام داده) و مشاهدات نشست برای نقاط کنترل به ترتیب ۱/۶ (میلی‌متر)، و ۳/۸ (میلی‌متر) بوده است. این مقادیر بهبود حدود ۶۳٪ در دقت مدل نشست حاصل از ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق بدون شرط پیوستگی را در مقایسه با مدل حاصل از داده‌های ابزار دقیق تنها، نشان می‌دهند.

برای ارزیابی مدل حاصل از ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق با اعمال شرط پیوستگی شبیه مقایسه قبلی انجام می‌شود به عنوان مثال، میانگین اختلاف بین نشست مدل‌سازی شده بر اساس ادغام و مشاهدات نشست در ۲۲۹ نقطه کنترل (۰/۲- میلی‌متر) می‌باشد. این مقدار بهبود حدود ۸۹٪ در صحت مدل نشست حاصل از ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق همراه با شرط پیوستگی را در مقایسه با مدل حاصل از داده‌های ابزار دقیق تنها نشان می‌دهند. همین نتایج از پارامترهای STD و RMS نیز بدست می‌آید. به عنوان مثال، STD و RMS اختلاف بین نشست مدل‌سازی شده بر اساس ادغام و مشاهدات نشست در نقاط کنترل به ترتیب ۰/۹ (میلی‌متر) و ۱/۰ (میلی‌متر)، می‌باشد که این مقادیر بهبود حدود ۷۳٪ در دقت مدل نشست حاصل از ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق همراه با شرط پیوستگی را در مقایسه با مدل حاصل از داده‌های ابزار دقیق تنها، نشان می‌دهند.

همچنین با توجه به نتایج جدول، برای جابجایی‌های پیش‌بینی شده از طریق مدل تغییرشکل حاصل از ادغام مشاهدات، دقت بالاتری در مقایسه با دقت هر کدام از مشاهدات ژئودتیکی و ابزار دقیق بطور مستقل که وارد پروسه ادغام شده‌اند برآورد شده است.

- [2] J. Lovse, W. Teskey, G. Lachapelle, M. Cannon, Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology, *Journal of Surveying Engineering*, 121(1) (1995) 35–40.
- [3] S. G. M. T. Radulescu, A. T. G. Radulescu, Kinematic Surveying a New Concept for Monitoring the Stability of Mining Construction, in: *Proceeding of 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2011*, 2 (2011) 279-286.
- [4] W. Teskey, D. Bayly, I. Colquhoun I, Measurement of Deformations in Buried Pipeline, *Journal of Surveying Engineering*, 118(1) (1992) 1–10.
- [5] W. M. Welsch, some aspects of the analysis of geodetic strain observations in kinematic models, *Tectonophysics*, 130 (1986) 437-458.
- [6] T. Bayrak, M. Yalçınkaya, Kinematic Analysis Program for Deformation Monitoring, in: *Proceeding of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece, 2003.
- [7] F. Lu, S. Wang, J. Li, X. Yan, Application of Kalman filter method based movement model in the dam deformation forecast, in: *Proceeding of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 5448961, Chengdu, China, 2010.
- [8] C. Maosen, Q. Pizhong, R. Qingwen, Improved hybrid wavelet neural network methodology for time-varying behavior prediction of engineering structures, *Neural Computing and Applications*, 18(2009) 821–832, DOI 10.1007/s00521-009-0240-8.
- [9] W. Kamiński, DiSTFAG method robust to gross errors in monitoring displacements and strains in unstable reference systems, *Geodesy and Cartography*, 60(1) (2011) 21-33.
- [10] W. Dai, B. Liu, X. Meng, D. Huang, Spatio-temporal modelling of dam deformation using independent component analysis, *Survey Review*, 46(339) (2014) 437-443.
- [11] E. Gökalp, L. Taşçi, Deformation monitoring by gps at embankment dams and deformation analysis. *Survey Review*, 41(311) (2009) 86-102.
- [12] C. Holst, M. Burghof, H. Kuhlmann, Modelling the Beam Deflection of a Gantry Crane under Load, *Journal of Surveying Engineering*, 140(1) (2014) 52–59.
- [13] F. Perner, P. Obernhuber, Analysis of arch dam deformations, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 4(1) (2010) 102-108.
- [14] C. H. Loh, C.H. Chen, T. Y. Hsu, Application of advanced statistical methods for extracting long-term trends in static monitoring data from an arch dam,



شکل ۴: شتاب مدل‌سازی شده نشست رویه سد بر اساس ادغام داده‌های ژئودتیکی و ابزار دقیق بعد از گذشت ۷۶ ماه از زمان مبنا

Fig. 4. The modeled settlement of dam surface based on the fusion of the geodetic and precise instrument data after passing 76 months since reference time

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش المان محدود توسعه یافته برای مدل‌سازی تغییرشکل رویه سازه بر اساس ادغام داده سنسورهای چندگانه با در نظر گرفتن شرایط پیوستگی تغییرشکل بین المان‌ها ارائه شده است. مزیت روش ارائه شده علاوه بر ادغام داده‌ها (۱) رفع مشکل عدم همزمانی اطلاعات از سنسورهای مختلف، (۲) رفع مشکل عدم وجود یک سیستم مختصات منحصر به فرد برای مشاهدات سنسورهای مختلف با تعریف یک چارچوب مرجع لخت، (۳) ارائه یک روش توسعه یافته المان محدود (ESFEM) با شرایط پیوستگی تغییرشکل بین المان‌ها که نتیجه آن روش کمترین مربعات برای سرشکنی مشاهدات سنسورهای مختلف است و (۴) برآورد وزن مناسب مشاهدات سنسورهای مختلف در کنار پارامترهای مجهول است.

جزئیات روش و نتایج عددی آن با استفاده از مشاهدات کنترلی سد خاکی کرخه به عنوان مطالعه موردی برای مطالعه نشست رویه سد توضیح داده شده است. نتایج ارائه شده بر موفقیت شروط پیوستگی بین المانی دلالت بر پیوستگی مدل تغییرشکل بر اساس روش المان محدود سطحی توسعه یافته در مطالعه نشست رویه سد خاکی می‌کند. همچنین نتایج نشان دهنده این است که نشست‌های حاصل از مدل نسبت به زمان مبنا در حال رسیدن به حالت پایداری نهایی است.

#### مراجع

- [1] O. Dascal, Postconstruction deformations of rockfill dams. *Journal of the Geotechnical Engineering Division-ASCE* 113(1) (1987) 46-59.

- Analysis of deformations of large earth dams. *Journal of Applied Geodesy*, 1 (2007) 81–89.
- [23] S. Gordon, D. Lichti, Modelling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement, *Journal of Surveying Engineering*, 133(2) (2007) 72–80.
- [24] V. Lyöri, A. Kilpelä, G. Duan, J. Kostamovaara, T. Aho, Monitoring of a bridge-deck using long-gage optical fiber sensors with a pulsed TOF measurement technique, in: *Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost*, 2006, pp 905-906.
- [25] K. M. Mosalam, M. T. Shakhzod, P. Sangjoon, Applications of laser scanning to structures in laboratory tests and field surveys, *Structural Control Health Monitoring*, 21(1) (2014) 115-134, DOI:10.1002/stc.1565.
- [26] É. Pinet, C. Hamel, B. Glišić, D. Inaudi, N. Miron, Health monitoring with optical fiber sensors: From human body to civil structures. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2007, 653219.
- [27] M. Jafari, Dynamical Modelling of Deformation of Structures via Combination of the Geodetic and Geotechnical data, PhD thesis, University of Tehran, 2012, (in Persian).
- [28] A. A. Ardalan, M. Jafari, Multi-sensor approach to settlement analysis of earth-dams, *Computational Geosciences* 16(1) (2012) 123-138. DOI: 10.1007/s10596-011-9258-y.
- Structural Health Monitoring, 10(6) (2011) 587-601.
- [15] T. Bayrak, Modelling the relationship between water level and vertical displacements on the Yamula Dam, Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(2) (2007) 289-297.
- [16] M. N. Kulkarni, N. Radhakrishnan, D. Rai, Global positioning system in disaster monitoring of Koyna dam, Western Maharashtra, *Survey Review* 38 (2006) 629-636.
- [17] S. I. Pytharouli, S. C. Stiros, Ladon dam (Greece) deformation and reservoir level fluctuations, evidence for a causative relationship from the spectral analysis of a geodetic monitoring record, *Engineering Structures*, 27(3) (2005) 361-370.
- [18] E. Bilotta, L. Pagano, S. Sica, Effect of ground-motion asynchronism on Equivalent acceleration of earth-dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 561-579.
- [19] R. L. Piao, A. H. Rippe, B. Myers, K. W. Lane, Earth-dam liquefaction and deformation analysis using numerical modelling, in: *Proceedings of GeoCongress*, 2006, pp. 1-6, DOI: 10.1061/40803(187)217.
- [20] J. Qi, A. Che, X. Ge, A study on the stability of earth-dam subjected to the seismic load. *International Journal of Modern Physics B*, 22 (2008) 5711-5716.
- [21] A. Szostak-Chrzanowski, A. Chrzanowski, M. Massiera, Use of deformation monitoring results in solving geomechanical problems-case studies, *Engineering Geology*, 79(1-2) (2005) 3-12.
- [22] A. Szostak-Chrzanowski, M. Massiera, A. Chrzanowski,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Jafari, Presentation of an Extended Surface Finite Element Method to Model the Deformation of Structures Continually; Case Study: Karkhe Earth dam, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 327-334.  
DOI: 10.22060/ceej.2017.11742.5069

