بررسي اثر تراوش بر پايداري توده سنگ درزه دار در تکيه‌گاه سدهاي قوسي

محمد خندان بکاولي[i]; محمد تقي احمدي[ii]; محمود يزداني[ii]

چکيده

تکيه‌گاه و پي از آسيب‌پذيرترين اجزاء سدهاي قوسي شمرده مي‌شود، بنابراين شناخت نقاط ضعف آنها از اولويتهاي اصلي خواهد بود. با توجه به اينکه نيروهاي حاصل از تراوش تاثيري بسيار زيادي بر پايداري تکيه‌گاه دارد، شناخت پديده تراوش در ساختگاههاي سنگي از اهميت بسياري برخوردار مي‌باشد. از مهمترين پديده‌هاي موجود در تراوش از محيطهاي توده‌سنگي، اندرکنش هيدرومکانيکال درزه‌ها مي‌باشد که اثر اين پديده بر روي تکيه‌گاه سدها و به طور خاص تکيه‌گاه سدهاي بتني قوسي کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در اين تحقيق، با تدوين الگوريتم مناسب و مدل کردن توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل چندلايه پيوسته براي بيان رفتار مکانيکي و با فرض لايه‌اي بودن جريان تراوش در درزه سنگ‌ها و استفاده از قانون مکعب و مدل معادل و پيوسته آن در توده سنگ، اثر پديده اندرکنش هيدرومکانيکال بر بازتوزيع تنش‌ها مورد مطالعه و بررسي قرار گرفته است. نتايج عددي، نشان دهنده موفقيت روش و همگرايي موثر چشمگير آن بوده و تراوش و يا اندرکنش يادشده، تاثير بسيار زيادي بر تنشهاي اصلي و ميانگين تفاضل تنشهاي اصلي داشته و حتي در مورد تنش‌هاي برشي تکيه‌گاه به ميزان ۴۰% اختلاف در نتايج مشاهده شده که بيانگر اهميت اين مطالعه مي‌باشد.

کلمات کليدي

سد قوسي، اندرکنش هيدرومکانيکال، توده سنگ درزه‌دار، اجزاء محدود

Study on the Effect of Seepage in Jointed Rocks at Arch Dams Abutments

M. Khandan Bakavoli; M.T. Ahmadi; M. Yazdani

ABSTRACT

Abutments and foundation are among the most vulnerable parts of arch dams therefore, understanding their defects are of high priority. As far as seepage forces have a great effect on abutment stability, understanding the seepage in rock masses has a great importance. Joints hydromechanical interaction is a phenomenon that is not studied sufficiently. In this research, an effective algorithm is devised so that the mechanical behavior of jointed rock mass has been described and modeled by an equivalent continuum rock model with multilaminate concept and the hydraulic behavior assuming laminar flow with cubic law for joint systems. The hydromechanical interaction is thus modeled for a hypothetical arch dam and the effect of the phenomenon is studied on the stresses, their redistribution and in the rock mass abutments. It is concluded that disregarding the seepage effect or the H-M interaction may introduce significant errors in displacements and shear stresses of dam abutments.

KEYWORDS

Arch dam, hydromechanical interaction, jointed rock mass, finite element

[i] دانش‌آموخته کارشناسي ارشد مهندسي عمران، دانشگاه تربيت مدرس EMail: M_kh_Bakavoli@yahoo.com

[ii] عضو هيات علمي بخش مهندسي عمران، دانشگاه تربيت مدرس EMail: MAhmadi@Modares.ac.ir

۱- مقدمه

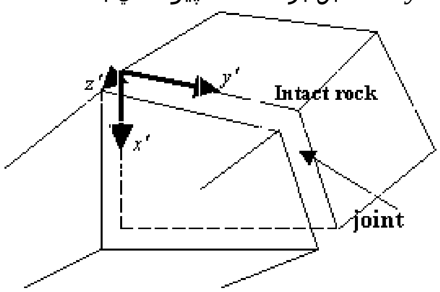
حوادث دنياي سدسازي همواره راهنماي خوبي براي مطالعه رفتار سدها و يافتن نقاط ضعف آنها و همچنين توانسته كمك شاياني به طراحان سد نموده تا در مورد پديده‌هايي كه در مطالعات آنها لحاظ نشده به جستجو و تحقيق بيشتر بپردازند. با نگاهي كوتاه به آمار مي‌توان دريافت كه يكي از شايع‌ترين دلايل شكست سدها مسائل مرتبط با پي و تكيه‌گاه به‌ويژه مشكلات مرتبط با پي سنگي سدهاي قوسي مي‌باشد [۶]. يكي از اين حوادث تاريخي، شكست سد مالپاسه در فرانسه به سال ۱۹۵۹ مي‌باشد.

در كوله چپ اين سد، جايي كه نيروي حاصل از سد به پي وارد مي‌شود اين نيرو به موازات لايه‌بندي اعمال گرديده، عاملي براي نفوذ حباب تنش در عمق شده است. با توجه به حساسيت نفوذپذيري در آن منطقه نسبت به تنش باعث پديدار شدن ناحيه‌اي با نفوذپذيري بسيار پائين شده كه اين خود بالا رفتن فشار آب حفره‌اي به اندازه هد كامل هيدرواستاتيكي سد را درپي داشته و با توجه به وجود گسل پائين‌دست گوه گسيختگي تشكيل ودرپايان منجر به شكست سد شده است[۱۲]. با توجه به طبيعت بسيار پيچيده تراوش در توده سنگ درزه‌دار و حساسيت نفوذپذيري توده سنگ نسبت به تنش، ضرورت مدل كردن پديده تراوش در توده سنگ درزه‌دار به خصوص بررسي اثر اندركنش هيدرومكانيكال بر چگونگي توزيع تنشها نسبت به حالتي كه تنشها بدون اثر تراوش در تكيه‌گاه محاسبه مي‌شوند، حس مي‌گردد. در اين تحقيق سعي بر آن شده تا با آناليز توام مكانيكي هيدروليكي توده سنگ درزه‌دار در پي و تكيه‌گاه سدهاي بتني تغييرات توزيع تنش مورد مطالعه قرار گيرد.

۲- رفتار هيدروليكي توده سنگ درزه‌دار

براي بررسي تراوش در توده سنگ درزه‌دار از دو مدل تراوش همگن و گسسته مي‌توان استفاده كرد. در مدل تراوش همگن، همانند تراوش از خاک، فرض مي‌شود از كل مقطع مورد نظر تراوش صورت مي‌پذيرد. در اين تحقيق با فرض مدل همگن پيوسته و جريان تراوش از درزه‌سنگها و لايه‌اي بودن جريان در درزه سنگها رفتار هيدروليكي توده سنگ درزه‌دار شبيه سازي شده است. از آنجا كه بازشدگي مكانيكي را نمي‌توان براي محاسبه نفوذپذيري بكار برد از مفهومي بنام بازشدگي هيدروليكي كه توسط بارتون و همكارانش ارائه شده است، استفاده گرديد.

براي بدست آوردن ماتريس نفوذپذيري لازم است كه سيستم مختصات محلي براي درزه‌ها تعريف شود. براي تعريف اين سيستم مختصات محلي، مطابق شكل ۱، فرض شده است كه محور z' عمود بر صفحه ناپيوستگي بوده و صفحه $x'y'$ منطبق بر صفحه ناپيوستگي باشد.



شكل (۱) چگونگي مختصات محلي

براي بدست آوردن بازشدگي هيدروليكي از رابطه ۱ استفاده مي‌شود [۹]:

$$e_0 = \frac{JRC^{2.5}}{\left(\frac{e}{e_0}\right)^{2.5}} \tag{۱}$$

كه در آن JRC ضريب زبري بوده، e_0 بازشدگي هيدروليكي و e بازشدگي مكانيكي مي‌باشد. با توجه به سرعت پايين جريان در درزه، فرض مي‌شود كه جريان لايه‌اي بوده و فرض قانون مكعب درست خواهد بود [۲]. بنابراين نفوذپذيري دسته درزه‌ها در سيستم مختصات محلي را مي‌توان به صورت رابطه ۲ بدست آورد:

$$k_{x'} = k_{y'} = \frac{e_0}{s} \cdot \frac{g \cdot e_0^2}{12\vartheta} \tag{۲}$$

كه در رابطه ۲، s فاصله‌داري درزه‌ها در يک دسته درزه خاص، g شتاب ثقل زمين و ϑ ويسكوزيته سينماتيكي آب مي‌باشد. دبي در واحد سطح را مي‌توان از رابطه ۳ بدست آورد:

$$\boldsymbol{q}' = \begin{Bmatrix} q_{x'} \\ q_{y'} \\ q_{z'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & k_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_{x'} \\ I_{y'} \\ I_{z'} \end{Bmatrix} \tag{۳}$$

كه در رابطه ياد شده، $I_{x'}, I_{y'}, I_{z'}$ گراديان هيدروليكي در مختصات محلي مي‌باشد. براي اينكه بردار $\mathbf{q}'$ را در سيستم مختصات كلي بتوان بدست آورد از رابطه ۴ استفاده مي‌شود:

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{T}^T \cdot \boldsymbol{K}_i{}' \cdot \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{I}' = \boldsymbol{K}_i \cdot \boldsymbol{I} \tag{٤}$$

كه ماتريس انتقال $[T]$ در آن به صورت رابطه ۵ مي‌باشد:

$$[T]=\begin{bmatrix} \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\cos\beta & -\sin\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\sin\beta & -\cos\beta \end{bmatrix} \tag{۵}$$

در رابطه ۵، α زاويه امتداد و β زاويه شيب دسته درزه i مي‌باشد. حال اگر n دسته درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، $\boldsymbol{K}$ ماتريس نفوذپذيري معادل براي توده سنگ به صورت رابطه ٦ بدست مي‌آيد [۷].

$$\boldsymbol{K}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{K}_i \tag{٦}$$

پس از تعريف خصوصيات هيدروليکي توده سنگ اکنون نوبت به بازنويسي معادلات اجزاء محدود مسئله مي‌رسد.

معادله حاکم تراوش در يک مسئله سه بعدي براي حالت پايدار به صورت رابطه ۷ نوشته مي‌شود:

$$k_x\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+k_y\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+k_z\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}+Q=0 \tag{۷}$$

در رابطه ۷، Q مقدار جريان عبوري در واحد زمان و φ تابع پتانسيل تراوش مي‌باشد. رابطه ۷ را به صورت رابطه ۸ مي‌توان بازنويسي کرد:

$$\nabla^T\boldsymbol{K}\nabla\varphi(x,y,z)+Q=0 \quad \text{روي حجم } \Omega، \tag{۸}$$

با تعريف شرايط مرزي مسئله تراوش به صورت رابطه ۹ نوشته مي‌شود:

$$\varphi=\overline{\varphi} \quad \text{روي } \Gamma_\phi \tag{۹}$$

$$q_n=q_p \quad \text{روي } \Gamma_q \tag{۱۰}$$

که در رابطه ۹ و ۱۰، $\overline{\varphi}$ ثابت، q_p مقدار دبي خروجي از مرز Γ_q مي‌باشد. با استفاده از روش اجزاء محدود براي حل مسئله ياد شده معادله ديفرانسيل رابطه ۸ به رابطه ساده ۱۱ تبديل خواهد شد:

$$\overline{\boldsymbol{K}}\boldsymbol{\varphi}=\overline{\boldsymbol{F}} \tag{۱۱}$$

که در آن:

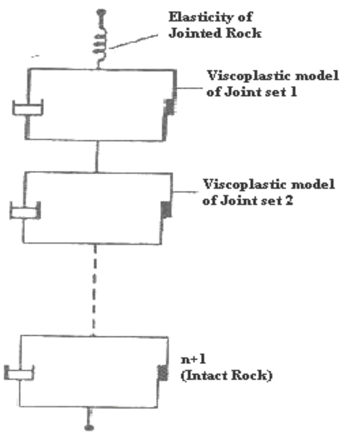
$$\overline{\boldsymbol{F}}=\int_\Omega \boldsymbol{N}^T Q d\Omega+\int_{\Gamma_q}\boldsymbol{N}^T q_p d\Gamma \tag{۱۲}$$

$$\overline{\boldsymbol{K}}=\int\nabla^T\boldsymbol{N}\boldsymbol{K}\nabla\boldsymbol{N}d\Omega \tag{۱۳}$$

که $\boldsymbol{N}$ تابع شکل و $\overline{\boldsymbol{K}}$ ماتريس نفوذپذيري مي‌باشد [۸].

۳-۳- رفتار مکانيکي توده سنگ درزه‌دار

با توجه به استفاده از مفهوم محيط معادل در توده سنگ درزه‌دار، در تحقيق حاضر از مدل ارائه شده چندلايه توسط زينکويچ و پاند [۱۳]، استفاده مي‌شود. اين مدل که بر اساس تئوري الاستوويسکوپلاستيسيته بيان شده است، قادر به مدل کردن لغزش، باز و بسته شدن چندين سري دسته درزه مي‌باشد. مدل فيزيکي چندلايه مطابق شکل ۲، شامل يک فنر براي مدلسازي رفتار ارتجاعي سنگ بکر و تعدادي واحد ويسکوپلاستيک براي مدلسازي دسته درزه‌ها مي‌باشد.



شکل (۲) مدل فيزيکي مدل چند لايه [۱۳]

فرضيات اين مدل عبارتند از:

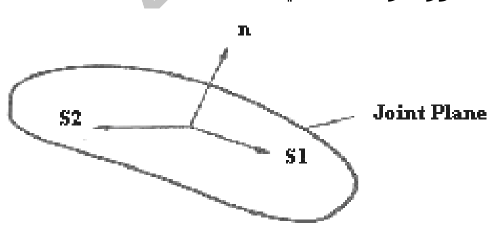
۱- تمام درزه‌هاي يک سري پيوسته، موازي و بدون پرشدگي فرض مي‌شوند.

۲- فاصله درزه‌ها در يک سري يکنواخت و خيلي کوچکتر از ابعاد سازه‌اي است که بايد تحليل شود.

شايان گفتن است که تمامي تحليلها در اين پژوهش با فرض نداشتن تسليم درزه‌سنگها در محيط انجام شده و تمامي آنها به صورت ارتجاعي خطي باقي مانده‌اند.

٤- ماتريس الاستيسيته توده سنگ درزه‌دار [۴]

مطابق شکل ۳ با فرض تنشها $\sigma_n, \tau_{s1}, \tau_{s2}$ و تغييرمکانهاي مشابه آنها $\delta_n, \delta_{s1}, \delta_{s2}$ رابطه بين تنشها و تغييرمکانهاي نسبي به صورت رابطه ١٤ مي‌باشد:



شکل (۳) سيستم مختصات محلي براي يک درزه

که در آن $\boldsymbol{D}^J$ يك ماتريس سختي ۳*۳ بوده و $\sigma^T=[\sigma_n,\tau_{s1},\tau_{s2}]$ بردار تنش در سيستم مختصات محلي

مي‌باشد. اگرچه ماتريس سختي در بازه تنشهاي وارده ثابت نمي‌باشد، اما اگر توجه معطوف به رفتار الاستيك گردد، اين اعضا را مي‌توان ثابت فرض نمود. علاوه بر آن، جمله‌هاي غير قطري را نيز صفر در نظر گرفته و براي ساده سازي بيشتر فرض مي‌شود كه $D_{s1}^{J} = D_{s2}^{J} = D_{s}^{J}$. بنابراين شكل ساده شده رابطه ۱۵ كه در مسائل عملي استفاده مي‌شود عبارت است از:

$$\boldsymbol{D^J} = \begin{bmatrix} D_n^J & 0 & 0 \\ 0 & D_s^J & 0 \\ 0 & 0 & D_s^J \end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

و ماتريس نرمي يك درزه به صورت رابطه ۱٦ نوشته مي‌شود:

$$\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{C^J \sigma} \qquad (۱٦)$$

$$\boldsymbol{C^J} = [\boldsymbol{D^J}]^{-1} \qquad (۱۷)$$

و ماتريس دسته درزه m ام به صورت رابطه ۱۸ نوشته خواهد شد:

$$\boldsymbol{C_m}^{\boldsymbol{JS}} = f_m \boldsymbol{C_m}^{\boldsymbol{J}} \qquad (۱۸)$$

كه در آن $\boldsymbol{C}_m{}^{JS}$ ماتريس نرمي دسته درزه m ام و f_m فراواني درزه‌ها در دسته درزه m ام مي‌باشد. با توجه به اينكه اين ماتريس نرمي در سيستم مختصات محلي تعريف شده است. با استفاده از رابطه ۱۹ به مختصات كلي جابجا مي‌گردد:

$$\boldsymbol{C}_m{}^{JSG} = f_m \boldsymbol{T}_m{}^{T} \boldsymbol{C}_m{}^{J} \boldsymbol{T}_m \qquad (۱۹)$$

كه C^{JSG} ماتريس نرمي سري درزه در مختصات كلي است و T در اينجا ماتريس انتقال ۶*۳ مي‌باشد و با استفاده از زواياي امتداد (α) و شيب درزه (β) قابل محاسبه است:

$$T_m{}^T = \begin{bmatrix} \sin^2\beta\cos^2\alpha & -\frac{1}{2}\sin 2\alpha\sin\beta & -\frac{1}{2}\cos^2\alpha\sin 2\beta \\ \sin^2\beta\sin^2\alpha & \frac{1}{2}\sin 2\alpha\sin\beta & -\frac{1}{2}\sin^2\alpha\sin 2\beta \\ \cos^2\beta & 0 & \frac{1}{2}\sin 2\beta \\ -\sin^2\beta\sin 2\alpha & -\sin\beta\cos 2\alpha & \frac{1}{2}\sin 2\alpha\sin 2\beta \\ -\sin\alpha\sin 2\beta & -\cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\cos 2\beta \\ \cos\alpha\sin 2\beta & -\sin\alpha\cos\beta & -\cos\alpha\cos 2\beta \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

اگر n سري درزه وجود داشته باشد نرمي كل بصورت رابطه ۲۱ بدست مي‌آيد.

$$\boldsymbol{C}^* = \sum_{m=1}^{n} \boldsymbol{C}_m{}^{JSC} \qquad (۲۱)$$

كرنش كلي در توده سنگ حاصل جمع كرنشهاي سنگ سالم و كرنشهاي مربوط به سري درزه‌ها مي‌باشد يعني:

$$\begin{aligned} &\varepsilon^{rm} = \varepsilon^{Ir} + \varepsilon^{j} = C^{ir}\sigma + C^{*}\sigma = (C^{Ir} + C^{*})\sigma \\ &\Rightarrow \sigma = (C^{I} + C^{*})^{-1}\varepsilon^{rm} = D^{rm}\varepsilon^{rm} \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

بنابراين ماتريس الاستيسيته توده سنگ درزه‌دار به صورت رابطه ۲۳ بدست مي‌آيد:

$$\boldsymbol{D}^{rm} = [\boldsymbol{C}^{Ir} + \sum_{m=1}^{n} f_m \boldsymbol{T}_m^T \boldsymbol{C}_m^J \boldsymbol{T}_m]^{-1} \qquad (۲۳)$$

در عمل n كمتر از ۵ بوده و اگر بيشتر از ۵ سري دسته درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، ناهمساني كه از دسته درزه‌ها بوجود مي‌آيد از بين رفته و توده سنگ به صورت همسان رفتار مي‌كند.

۵- معادلات اجزاي محدود براي تنش موثر

با توجه به اينكه محيط تكيه‌گاه و پي سد اشباع در نظر گرفته مي‌شود، ارتباط بين ميدان تنش و ميدان جريان تراوش با مفهومي بنام تنش موثر σ' بيان مي‌شود. تنش كل σ با رابطه ۲٤ به تنش موثر تبديل مي‌گردد:

$$\sigma = \sigma' - \boldsymbol{m}p \qquad (۲٤)$$

كه در آن

$$p = \gamma_w(\varphi - z) \qquad (۲۵)$$

$$\boldsymbol{m}^T = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \qquad (۲۶)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}{}' - \gamma_w(\varphi - z), \quad \tau_{xy} = \tau_{xy}{}' \qquad (۲۷)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{yy}{}' - \gamma_w(\varphi - z), \quad \tau_{xz} = \tau_{xz}{}' \qquad (۲۸)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zz}{}' - \gamma_w(\varphi - z), \quad \tau_{yz} = \tau_{yz}{}' \qquad (۲۹)$$

كه در معادلات بالا γ_w وزن مخصوص آب و $\boldsymbol{p}$ فشار است.

با نوشتن معادلات تعادل مكانيكي براي يك المان بي‌نهايت كوچك سه بعدي به دست خواهد آمد:

$$A(u) = \begin{Bmatrix} \frac{\partial\sigma_{xx}{}'}{\partial x} - \gamma_w\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}{}'}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xz}{}'}{\partial z} \\ \frac{\partial\sigma_{yy}{}'}{\partial y} - \gamma_w\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{yx}{}'}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}{}'}{\partial z} \\ \frac{\partial\sigma_{zz}{}'}{\partial z} - \gamma_w\frac{\partial\varphi}{\partial z} + \gamma_w + \frac{\partial\tau_{xz}{}'}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}{}'}{\partial y} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{Bmatrix} = 0 \qquad (۳۰)$$

كه در آن $\boldsymbol{b} = [\boldsymbol{b_x} \quad \boldsymbol{b_y} \quad \boldsymbol{b_z}]^T$ نيروي حجمي مي‌باشد.

پس از حل معادلات ديفرانسيلي ۳۰ با استفاده از روش اجزاء محدود معادلات تعادل به صورت رابطه ۳۱ نوشته خواهد شد[۸]:

$$\int \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{D}^{rm} \boldsymbol{B} dv \cdot \boldsymbol{a} - \int \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{b} dv - \int \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{t} d\Gamma$$

$$- \int \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{D}^{rm} \varepsilon_0 dv - \int \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0{}' dv - \int \boldsymbol{N}^T n\gamma_w dv + \int \boldsymbol{N}^T \gamma_w i dv = 0$$

(۳۱)

که D^{rm} ماتريس الاستيسيته معادل توده سنگ بوده، ε_0 کـرنش اوليه، σ_0' تنش اوليه، B ماتريس انتقال كرنش، N تـابع شـكل و $n^T = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$ و $i^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial\varphi}{\partial x} & \frac{\partial\varphi}{\partial y} & \frac{\partial\varphi}{\partial z} \end{bmatrix}$ و $\boldsymbol{a}$ بردار مقادير گرهي جابجايي است.

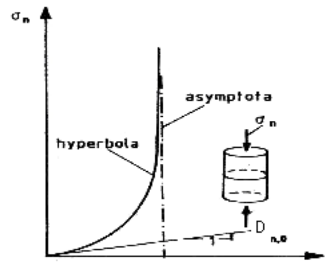
همانطور که از رابطه ۳۱ پيدا است حلقه ارتباطي فضاي تنش با ميدان جريان تراوش آخرين عبارت رابطه يادشده مي‌باشد. به اين ترتيب که ابتدا مسئله تراوش حل شده و گراديان هيدروليکي i بدست مي آيد. سپس نيروهاي تراوش از مسئله تراوش محاسبه شده و با حل معادله ۳۱ جابجايي‌ها و در پايان، تنشهاي موثر بدست مي‌آيند. با استفاده از اين تنشها و روابط تغيير شكلي درزه‌ها، بازشدگي‌ها تصحيح و نفوذپذيري جديد بدست مي‌آيد. با در نظر گرفتن اين نفوذپذيري ها مسئله تراوش دوباره حل شده و نيروها بدست آمده و تنشها تصحيح مي‌شوند. اين عمليات تا برآورده شدن ضوابط همگرايي ادامه پيدا مي‌کند (نمودار جرياني شکل ۷) [۱۰]. شايان گفتن است که به علت پيچيدگي زياد فرمولبندي‌ها و ايجاد ماتريسهاي نامتقارن و افزايش چشمگير زمان حل، روش حل مستقيم و به صورت درگير coupled قابل توصيه نبوده و در اين موارد روش تکرار گفته شده موفق، سريع و موثرتر است [۸].

٦- محاسبه بازشدگي(بسته‌شدگي) دهانه درزه‌ها:

براي بيان اندرکنش لازم است که مشخص شود تحت اثر تنش‌هاي وارده چه تغييراتي در بازشدگي (بسته‌شدگي) دهانه درزه‌هاي موجود در توده سنگ اتفاق مي‌افتد. براي تغييرات دهانه درزه‌ها (بسته شدگي) با فرض برقرار بودن قانون هذلولي گودمن از رابطه ۳۲ استفاده مي‌شود [۱۱]:

$$\sigma_n{}' = \frac{D_{n,0}{}^J . e_i}{\mu} [(\frac{e_i}{e_i - e_{new}})^{\mu} - 1] \qquad (۳۲)$$

کـه در رابطـه ۳۲ $\sigma_n{}'$، تـنش نرمـال روي صـفحه ناپيوسـتگي، $D_{n,0}{}^J$ سختي اوليه درزه مطابق شکل ٤، e_i انـدازه دهانـه درزه قبلي، e_{new} اندازه دهانه درزه تحت اثر تـنش و μ پـارامتر ثابـت بوده که از آزمايش بدست مي‌آيد. حال بـا اسـتفاده از رابطـه ۱ بازشدگي مکانيکي به بازشدگي هيدروليکي مرتبط مـي‌شـود. از آنجا که مسئله در سيستم مختصات کلي حل مي‌شود لازم است که تنش بدست آمده با ماتريس انتقال $\bar{T}$ به سيـستم مختـصات محلي منتقل مي‌گردد.



شکل (۴) تغيير شکل نرمال نسبت به تنش نرمال [۱۱]

$$\{\sigma'\} = [\bar{T}]\{\sigma\} \qquad (۳۳)$$

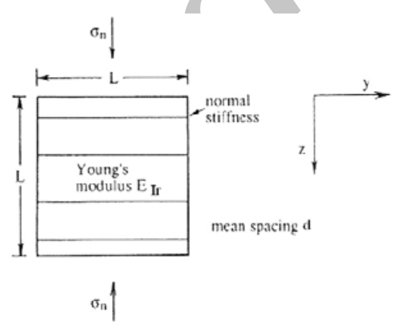
$$[\bar{T}] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & 0 & 2l_1m_1 & 0 & 0 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & 0 & l_1m_2 + l_2m_1 & m_1n_2 & n_2l_1 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + l_3m_2 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & 0 & l_1m_3 + l_3m_1 & m_1n_3 & n_3l_1 \end{bmatrix}$$

(۳٤)

که در آن:

$$l_1 = \sin\alpha \qquad m_1 = \cos\alpha \qquad n_1 = 0$$
$$l_2 = \cos\alpha\cos\beta \qquad m_2 = -\sin\alpha\cos\beta \qquad n_2 = -\sin\beta$$
$$l_3 = -\cos\alpha\sin\beta \qquad m_3 = \sin\alpha\sin\beta \qquad n_3 = -\cos\beta$$

اما در حالتي که درزه‌ها در معرض تنش کششي قرار گيرند و با توجه به اينکه مشابه شکل ٤ ديگر رابطه‌اي (به مانند آزمايشهاي فشاري که بر روي سنگها انجام شده است) نباشد، با استفاده از مفهوم معادل و روابط بعدي ارتباط بين تغييرات اندازه دهانه درزه‌ها نسبت به تنش کششي بدست خواهد آمد [۵].



شکل (۵) نمونه مکعبي با يک دسته درزه [۵]

شکل ۵، نمايش مقطعي از يك نمونه مكعبي سنگي با طول L است که يك دسته درزه افقي، با فاصله داري d، آنرا قطع کرده است. با توجه به فاصله‌داري گفته شده تعداد درزه‌هايي که مقطع سنگي به ضخامت L را قطع مي‌کند برابر L/d مي‌باشد. با فرض ارتجاعي بودن سنگ بکر با مدول الاستيسيته

E_{ir} ، کرنش کلي نمونه فوق تحت اثر تنش کششي برابر:

$$\varepsilon^{rm'} = \varepsilon^{ir'} + \varepsilon^{j'} \tag{۳۵}$$

که در آن $\varepsilon^{rm'}$ کرنش کلي توده سنگ ، $\varepsilon^{ir'}$ کرنش سنگ بکر، $\varepsilon^{j'}$ کرنش ناشي از بازشدگي درزه‌ها در مختصات محلي مي‌باشد.

$$\Delta l = \frac{\sigma_n'}{E_{Ir}}(L - e_{new}) + \frac{L}{d}.\frac{\sigma_n'}{D_{tension}} \tag{۳۶}$$

که در رابطه ۳۶ σ_n'، تنش نرمال در صفحه ناپيوستگي و $D_{tension}$ سختي کششي درزه سنگها را نمايش مي‌دهد. با فرض $L - e_{new} \cong L$ و تعريف ضريبي به نام θ به صورت رابطه ۳۷ به دست خواهد آمد:

$$\theta = \frac{\varepsilon_{Ir}'}{\varepsilon_j'} = \frac{\dfrac{\sigma_n'}{E_{Ir}}}{\dfrac{\sigma_n'}{D_{tension}\cdot d}} = \frac{D_{tension}\cdot d}{E_{Ir}} \Rightarrow \varepsilon^{rm'} = \theta\varepsilon^{j'} + \varepsilon^{j'} \tag{۳۷}$$

$$\varepsilon^{j'} = \frac{\varepsilon^{rm'}}{1+\theta} \Rightarrow \frac{e_{new}}{d} = \frac{\varepsilon^{rm'}}{1+\theta} \tag{۳۸}$$

براي بدست آوردن کرنش با توجه به اينکه مسئله در سيستم مختصات کلي حل مي‌شود بايد از ماتريس انتقال، رابطه ۳۹، براي بدست آوردن کرنش در سيستم مختصات محلي استفاده کرد.

$$\{\varepsilon'\} = [D']^{-1}\{\sigma'\} = [D']^{-1}[\bar{T}]\{\sigma\} \tag{۳۹}$$

که در آن $\{\varepsilon'\}$ کرنش در مختصات محلي است.

۷- چگونگي پيدا کردن سطح تراوش

براي کامل شدن اين الگوريتم، در برنامه توسعه داده شده توسط نويسندگان و بر اساس FEAPpv [۱٤] تحت عنوان برنامه FEAP-HM، با استفاده از الگوريتم دساي [۳] اقدام به شناسايي سطح تراوش کرده تا بتوان به کمك آن مناطق خشك را از مناطق اشباع تميز داده و نيروهاي حاصل از تراوش را در آن به طور دقيق‌تر لحاظ کرد. تابع پتانسيل توسط رابطه ٤٠ بدست مي‌آيد.

$$\varphi = z + \frac{p}{\gamma} \tag{٤٠}$$

مقدار پتانسيل بر روي نقاط واقع بر روي سطح تراوش برابر هد ارتفاعي مي‌باشد. اين مطلب مشابه آنست که گفته شود هد ناشي از فشار آب روي اين نقاط صفر مي‌شود. الگوريتم دساي با شناسايي نقاطي که مقدار تابع پتانسيل روي آنها از ارتفاع آنها کمتر مي‌باشد، يعني اينکه داراي هد ارتفاعي منفي مي‌باشند شناسايي کرده و با حذف سهم آنها در ماتريس $\bar{K}$ در رابطه ۱۱ دوباره معادله ياد شده را حل کرده و پتانسيل‌هاي گرهي جديدي حاصل مي‌شود. با کنترل دوباره باز هم نقاط واقع در بالاي سطح تراوش شناسايي و تا آخرين المان ادامه مي‌يابد. الگوريتم شناسايي سطح تراوش در برنامه FEAP-HM از نمودار جرياني شکل ٦ استفاده مي‌شود.

در نمودار جرياني مورد اشاره k شمارشگر نقاط گرهي هر المان (در تحقيق حاضر المانها ۸ گرهي هستند) مي‌باشد. m شمارشگر تشخيص تعداد نقاط گرهي بالاي سطح تراوش هر المان است. در صورتي که m=۸ باشد اين المان در بالاي سطح تراوش بوده و بايد سهم آن از ماتريس $\bar{K}$ حذف گردد. n شمارشگري است که تعداد تکرار براي شناسايي سطح را بدست مي‌دهد.

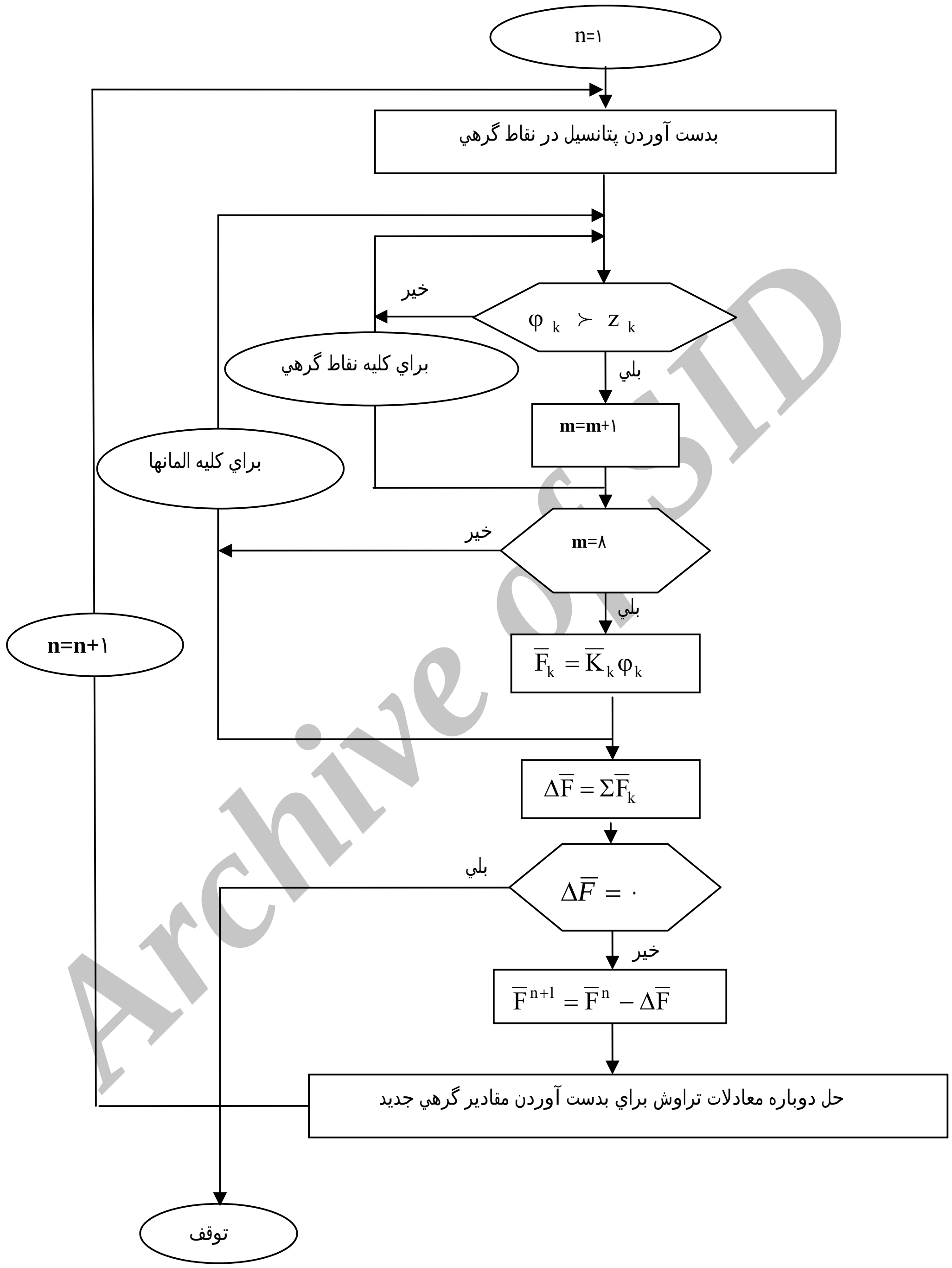
به اين ترتيب از آنجا که برنامه FEAPpv قابليت مدلسازي رفتار توده سنگ درزه‌دار را نداشته است در اين تحقيق، اين قابليت به همراه مدل رفتاري چندلايه و تراوش در توده سنگ به برنامه اضافه شده است. الگوريتم کلي حل مسئله با استفاده از برنامه FEAP-HM به صورت شکل ۷ خواهد بود.

۸- مدل بدنه و تکيه‌گاه سد قوسي [۱]

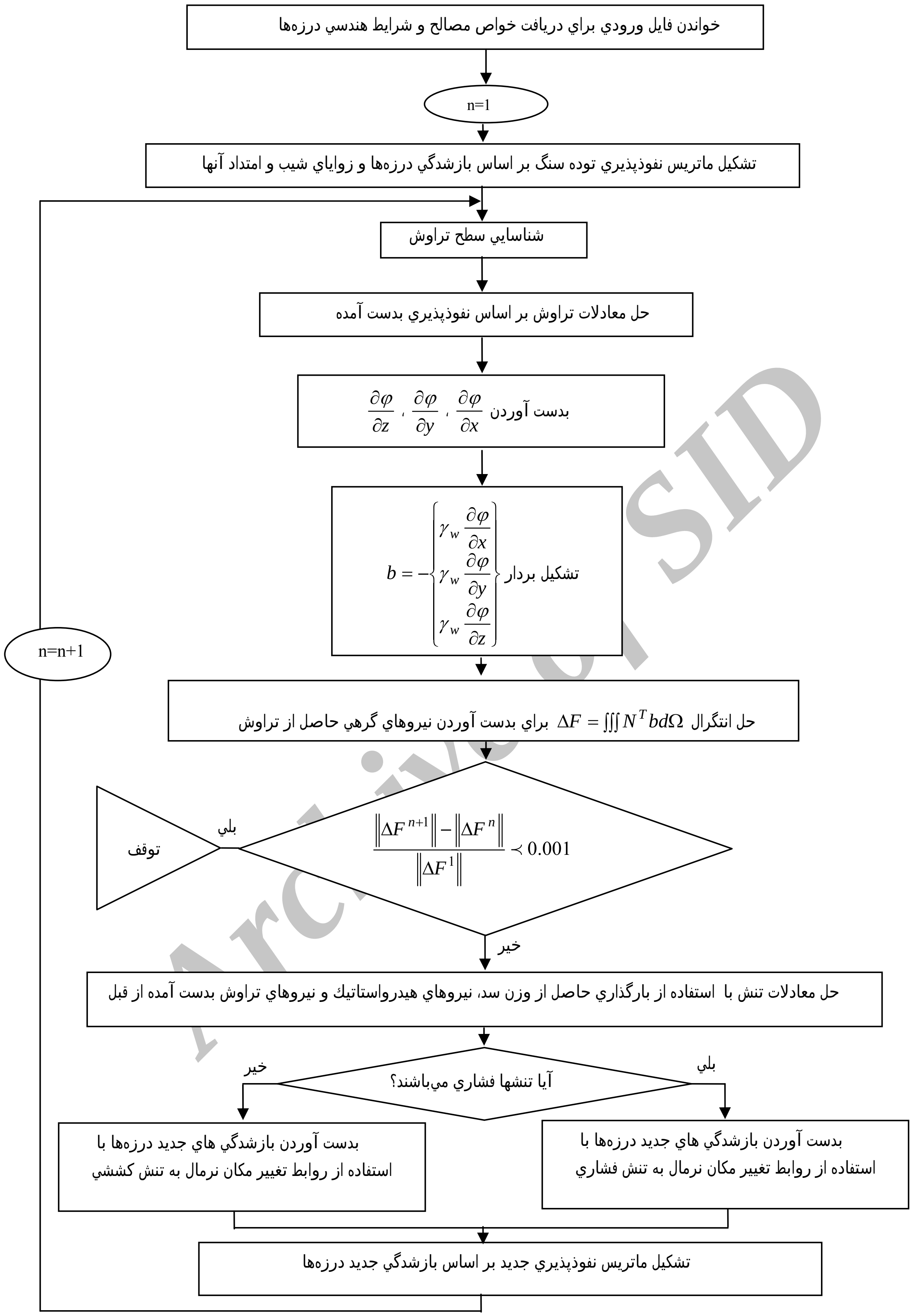
براي توليد هندسه سد و تکيه‌گاه از مشخصات سد قوسي ماروپوينت (*Morrow Point*) استفاده شده است. تراز تاج سد از کف مخزن برابر ۱٤۱,۷۳ متر، طول تاج ۲۲۰,٦۷ متر، عرض تاج ۳,٦٦ متر و در پي برابر ۱۵,۸۵ متر مي‌باشد. هندسه سد به صورت متقارن مدل شده است. براي در نظر گرفتن اثرات متقابل بدنه وپي به اندازه ۱۵۰ متر از کف مخزن به عنوان پي در نظر گرفته شده است. تکيه‌گاه به اندازه ۱۰۰ متر در بالادست و به اندازه ۲۵۰ متر در پايين دست مدل شده است. با توجه به امتدادها و شيب‌هاي مفروض براي سه تيپ درزه‌اي که در پي در نظر گرفته شده مي‌توان مسئله را به صورت متقارن تحليل کرد و بنابراين نيمي از مدل براي تحليل استفاده شده است. البته بايد توجه داشت در صورت وجود درزه‌هايي با زاويه شيب به طرف داخل دره مسئله نامتقارن شده و بايد مدل به صورت کامل تحليل شود.

۳۰ المان خطي آجري ۸ گرهي براي مدل کردن بدنه سد و ۳۸۰ المان آجري گرهي با مدل رفتاري چند لايه براي مدل کردن پي و تکيه‌گاه استفاده شده است. تعداد ٦۰۱ گره کل بدنه سد و تکيه‌گاه را تشکيل مي‌دهند. تراز سطح آب در مدل برابر با رقوم تاج سد در نظر گرفته شده است. قبل از آبگيري سطح آب

زيرزميني در تراز كف دره بوده است. براي بررسي اثر اندركنش هيدرومكانيكال روي چگونگي توزيع تنشها از سه تيپ دسته درزه استفاده شده است. مشخصات مصالح استفاده شده در تحليل ها در جدول ۱ نشان داده شده است. اين مشخصات تا حد امكان ضعيف فرض شده تا بتوان با افزايش تغيير مكان، تاثير روي آبگذراني و رفتار هيدروليكي را افزوده و از اين طريق اندركنش هيدرومكانيكال پررنگ‌تر ديده شود. با اين وجود رفتار سنگ را مي‌توان با دقت خوبي خطي در نظر گرفت.



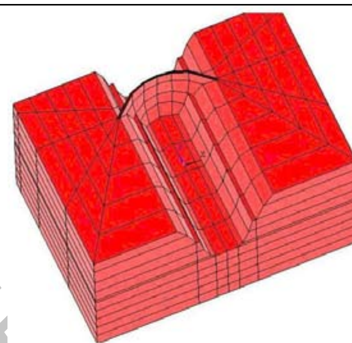
شكل (۶) الگوريتم جرياني چگونگي شناسايي سطح تراوش در برنامه **FEAP-HM**



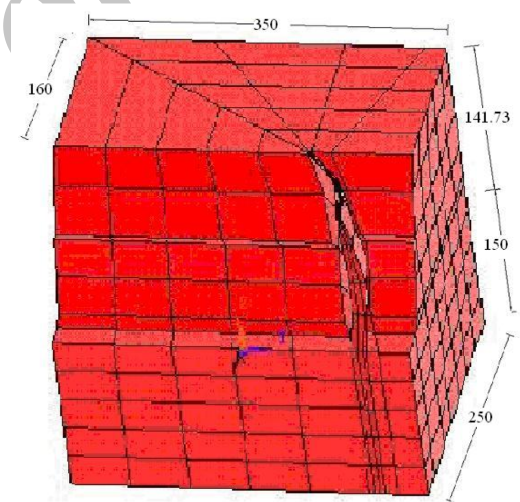
شكل (۷) الگوريتم جرياني چگونگي براي محاسبه اندركنش هيدرومكانيكال در برنامه **FEAP-HM**

جدول ۱- خواص مصالح

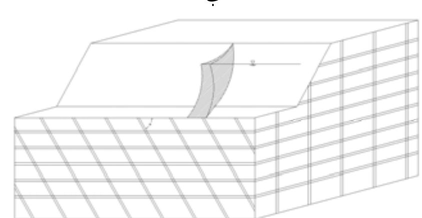
بتن	سنگ بکر	دسته‌درزه سنگ	سیال
$E_{con} = 20GPa$	$E_{Ir} = 3GPa$	$D_n = 50000MPa/m$	$\rho_{wat} = 1000kg/m^2$
$\upsilon = 0.2$	$\upsilon = 0.25$	$D_s = 25000MPa/m$	$\vartheta_{wat} = 10^{-6}m^2/s$
$\gamma_{con} = 2500kg/m^3$		$JRC = 5$	$g = 9.81m/s^2$
		$D_{n,i} = 10000MPa/m$	
		$D_{tens} = 10000MPa/m$	
		$\mu = 0.5$	
		$d = 0.3m$	



الف



ب



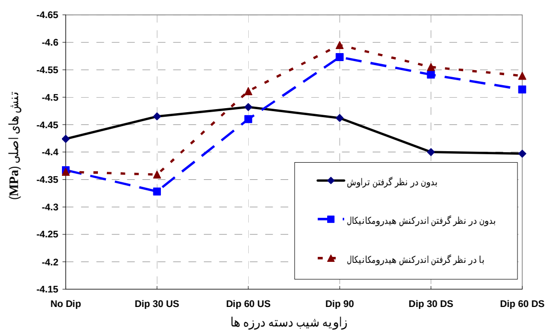
ج

شکل (۸) المان بندي هندسه سد و تکيه گاه و قرارگيري درزه‌ها
الف- مدل کامل ب- مدل المان محدوداستفاده شده در تحليل به علت تقارن ج- مدل شماتيک درزه‌ها

۸-۱- تکيه‌گاه با يك دسته درزه

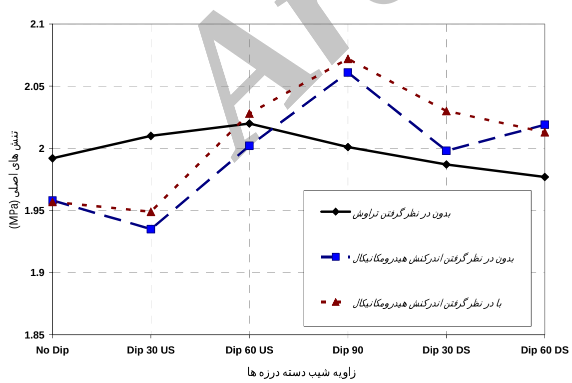
تکيه‌گاه و پي حاوي يك دسته درزه است. امتداد اين دسته درزه به موازات محور سد بوده و زاويه شيب به سمت بالادست و پايين‌دست جهت مطالعه و بررسي قابل تغيير مي‌باشد.

نتايج حاصل از بازتوزيع تنشها براي حالت مختلف از زاويه شيب دسته درزه‌ها به صورت مقايسه حداکثر تنشهاي اصلي و بيشينه تنش‌هاي برشي در بدنه و تکيه‌گاه سد، براي حالات بدون در نظر گرفتن اثر تراوش در تکيه‌گاه، با در نظر گرفتن تراوش بدون اثر اندرکنش هيدرومکانيکال و با در نظر گرفتن اندرکنش هيدرومکانيکال مطالعه شده و نتايج ترسيم شده است.



شکل (۹) مقايسه حداکثر تنش‌هاي اصلي در بدنه سد

در شکل ۹ مشاهده مي‌شود که اثر مدلسازي تراوش و اندرکنش هيدرومکانيکال تاثير زيادي بر توزيع تنشها در بدنه سد نخواهد داشت. شايان گفتن است که کليه مقادير تنشهاي بيشينه در تراز ۷۳ متري مجاور تکيه‌گاه در پاياب اتفاق افتاده است که با توجه به المان‌بندي سد در محدوده ۲/۳ مياني به لحاظ ارتفاعي قرار مي‌گيرد.

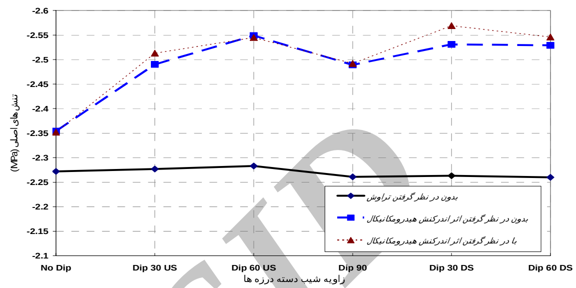


شکل (۱۰) مقايسه بيشينه تنشهاي برشي در بدنه سد

همانطور که در شکل ۱۰ هم مشاهده مي‌شود بازهم اثر تراوش تاثير زيادي بر بازتوزيع تنشهاي برشي در بدنه سد

نمي‌گذارد.

در مورد تنش‌هاي بوجود آمده در تكيه‌گاه ديگر نمي‌توان از اين اثرات چشم‌پوشي كرد. در شكل ۱۱ مشاهده مي‌شود كه تنش‌هاي اصلي در تكيه‌گاه در حالتي كه تراوش در تكيه‌گاه‌ها مدل نشده است بسيار كمتر از حالتي است كه تراوش در تكيه‌گاهها منظور شده باشد. علاوه بر آن اثر اندركنش هيدرومكانيكال بر تنش‌هاي بوجود آمده در مقايسه با حالتي كه اين اثر در نظر گرفته نشده است نيز جلب نظر مي‌نمايد.



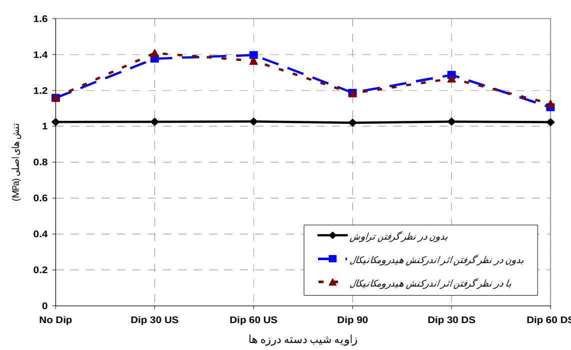
شكل (۱۱) مقايسه حداكثر تنش‌هاي اصلي در تكيه‌گاه

در شكل ۱۲ بيشينه تنشهاي برشي در تكيه‌گاه سد نشان داده شده است. همانطور كه از شكل پيدا است، بدون منظور كردن اثر تراوش در تكيه‌گاه‌ها، تنش برشي در سطح پايين‌تري از تنش‌هاي واقعي قرار مي‌گيرد. از آنجا كه اختلاف نزديك۴۰% وجود دارد، نديده گرفتن اثر تراوش موجب تحليل بسيار غير ايمن از رفتار پي خواهد بود. اثر اندركنش هيدرومكانيكال نيز در اين مورد ناچيز است.

۸-۲- تكيه‌گاه با دو دسته درزه

تكيه‌گاه و پي حاوي دو دسته درزه بوده، امتداد دسته درزه اول همانند قبل به موازات محور سد بوده و زاويه شيب متغير مي‌باشد.

دسته درزه دوم داراي امتداد عمود بر محور سد (واقع در صفحه xz) و داراي زاويه شيب ۹۰درجه نسبت به افق مي‌باشد.

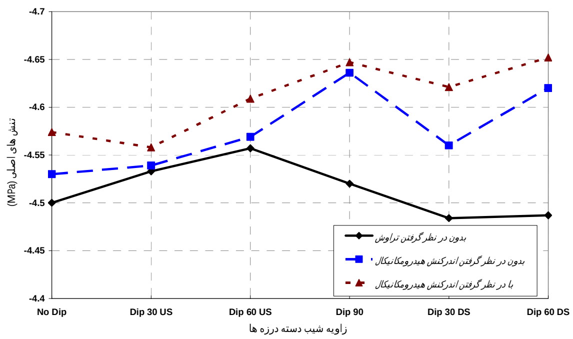


شكل (۱۲) مقايسه بيشينه تنشهاي برشي در تكيه‌گاه

غير از زواياي امتداد و شيب، ساير مشخصات كليه دسته درزه‌ها مطابق جدول ۱ مي‌باشد.

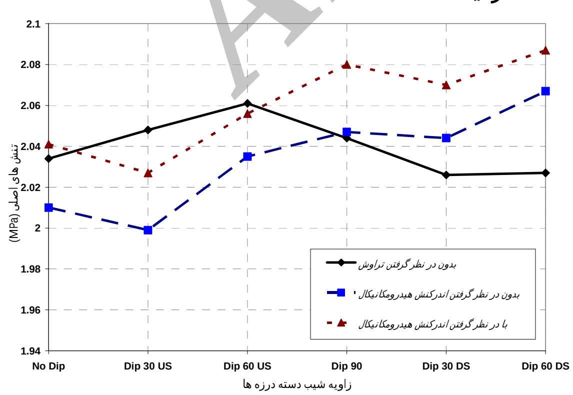
در شكلهاي ۱۳ و ۱۴ ديده مي‌شود كه اثر تراوش در تكيه‌گاه بر روي تنش‌هاي بوجود آمده در بدنه سد و همچنين بيشينه تنشهاي برشي در مقايسه با حالت مدل نمودن تكيه‌گاه بدون در نظر گرفتن نيروهاي تراوش، زياد نيست.

اما باز هم در پاره‌اي از موارد اين اختلاف قابل ملاحظه مي‌شود. مطابق آنچه در شكل ۱۴ نشان داده شده است، در حالتي كه دسته درزه اول داراي زاويه شيب ۳۰ و ۶۰درجه به طرف پايين دست باشد، اختلاف قابل توجهي در تنش‌هاي موجود در بدنه سد در حالتي كه تراوش در تكيه‌گاه‌ها مدل شده نسبت به حالتي كه تراوش در تكيه‌گاه مدل نشده است، مشاهده مي‌گردد.



شكل (۱۳) مقايسه حداكثر تنش‌هاي اصلي در بدنه سد

در شكل ۱۵ نشان داده شده است كه اگر نيروهاي حاصل از تراوش در تكيه‌گاه در مدلسازي وارد نگردند، تنش‌هاي حاصل در تكيه‌گاه در مقايسه با حالتي كه اين نيروها در نظر گرفته مي‌شوند، بسيار پايين‌تر مي‌باشد. اين نكته دربردارنده اين واقعيت است كه تراوش اثر بسزايي بر تنش‌ها در تكيه‌گاه مي‌گذارد، بر خلاف آنچه در مورد وضعيت تنشها در بدنه سد مشاهده گرديد.

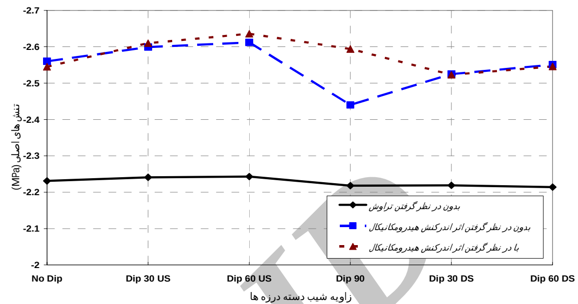


شكل (۱۴) مقايسه بيشينه تنشهاي برشي در بدنه سد

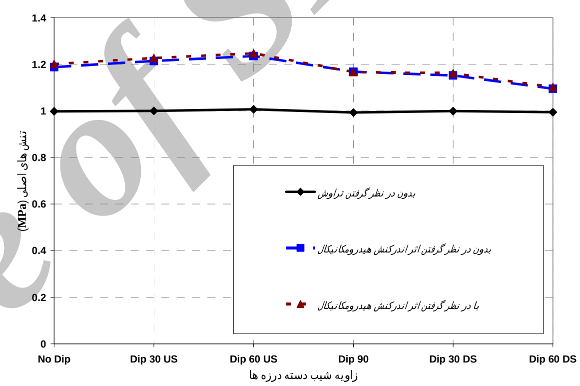
در شکل ١٦ به خوبي اختلاف بين بيشينه تنشهاي برشي در تكيه‌گاه در حالتي كه تراوش در تكيه‌گاه مدل نشده و در حالتي كه در مدلسازي وارد مي‌شود، نشان داده شده است.

٨-٣- تكيه‌گاه با سه دسته درزه

تكيه‌گاه و پي حاوي سه دسته درزه بوده، امتداد دسته درزه اول همانند حالت اول داراي امتدادي به موازات محور سد

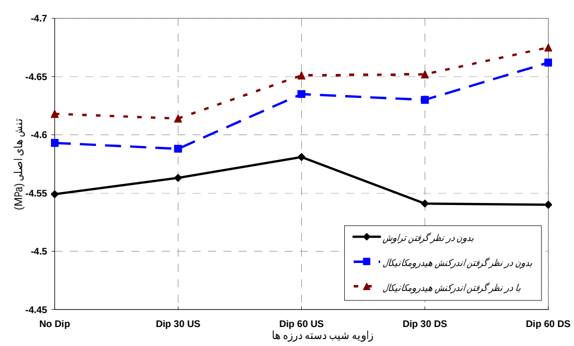


شكل (١۵) مقايسه حداكثر تنش‌هاي اصلي در تكيه‌گاه



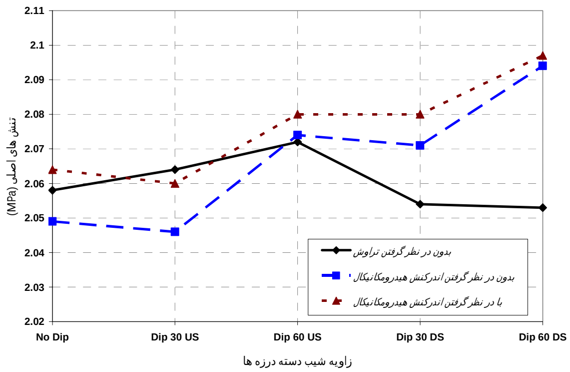
شكل (١۶) مقايسه بيشينه تنشهاي برشي در تكيه‌گاه

بوده و داراي زاويه شيب متغير مي‌باشد. دسته درزه دوم داراي امتدادي عمود بر محور سد و داراي زاويه شيب ٩٠ درجه نسبت به افق مي‌باشد. دسته درزه سوم داراي امتدادي به موازات محور سد و با زاويه شيب ٩٠ درجه مي‌باشد. مشخصات همه دسته درزه‌ها برابر جدول ١ مي‌باشد.

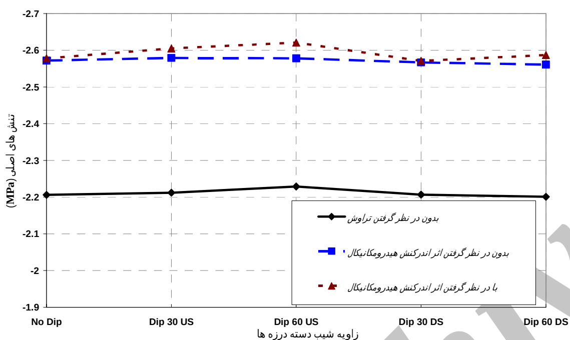


شكل (١٧) مقايسه حداكثر تنش‌هاي اصلي در بدنه سد

در شكلهاي ١٧ و ١٨ هم مشاهده مي‌شود كه در صورتي كه دسته درزه داراي شيب ٣٠ و ٦٠درجه به طرف پايين دست باشد، اختلاف قابل توجهي در تنش‌هاي بوجود آمده در بدنه سد مشاهده مي‌گردد. اثر اندركنش هيدرومكانيكال مقادير تنش بيشتري نسبت به حالت منظور نشدن اندركنش، بدست مي‌دهد كه در شكل‌هاي ١٧ و ١٨ ديده مي‌شود.

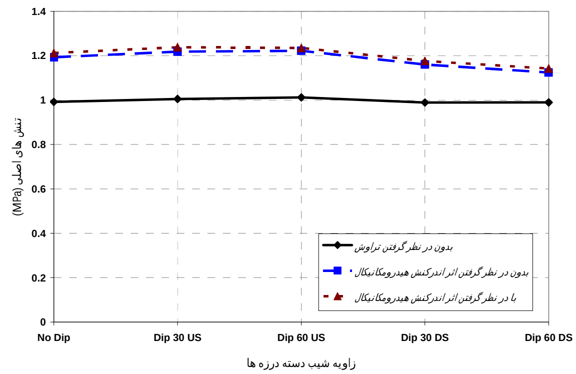


شكل (١٨) مقايسه بيشينه تنشهاي برشي در بدنه سد



شكل (١٩) مقايسه حداكثر تنش‌هاي اصلي در تكيه‌گاه

در شكل ١٩ مشاهده مي‌شود كه حداكثر تنش اصلي اتفاق افتاده در حالتي كه تراوش در مدل وارد نشده است نسبت به حالتي كه تراوش در تكيه‌گاه در مدلسازي وارد مي‌شود، بسيار كمتر است و اين نشان دهنده اثر قابل اعتنا تراوش بر روي توزيع تنش‌ها در تكيه‌گاه مي‌باشد. در مورد مقايسه توزيع بيشينه تنشهاي برشي در تكيه‌گاه نيز اين قضيه درست خواهد بود. بايد توجه شود كه اين ميانگين از معيارهاي مقاومت به حساب مي‌آيد و اين اختلاف ٢٠% نشان داده شده در شكل ٢٠ بسيار قابل توجه مي‌باشد.



شكل (۲۰) مقايسه بيشينه تنشهاي برشي در تكيه‌گاه

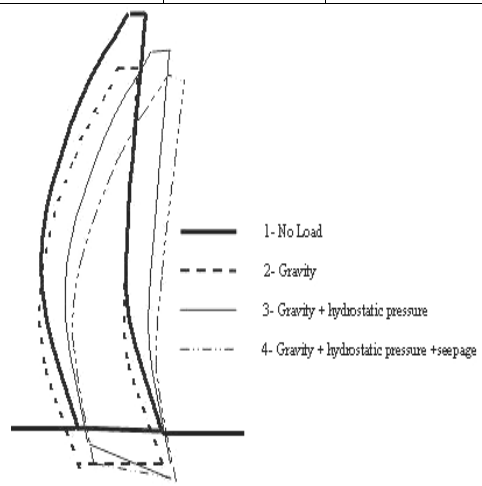
۸-٤- مقايسه تغيير شكلها

از نكات قابل طرح، مقايسه نتايج حاصل از تغيير شكل‌ها مي‌باشد. نتايج حاصل از تحليل توسط برنامه FEAP-HM براي سه دسته درزه عمود برهم (حالت سوم، دسته درزه اصلي با شيب صفر درجه) با مشخصات جدول (۱) در شكل ۲۱ نشان داده شده است. همانطور كه مشاهده مي‌شود تغيير مكان حاصل از بارگذاري‌هاي مختلف در شكل ۲۱ نشان داده شده است. تغيير مكان حداكثر حاصل از بار وزن برابر ۲,۲۷ سانتيمتر، تغيير مكان حاصل از بارگذاري وزن و فشار هيدرواستاتيك بر بدنه برابر ٤,۸٦ سانتيمتر و تغيير مكان حاصل از بارگذاري وزن، فشار هيدرواستاتيك و نيروهاي حاصل از تراوش برابر ۷,٥٦ سانتيمتر بوده كه اثر قابل توجه تراوش بر تغييرمكان‌ها را نيز نشان مي‌دهد. براي مقايسه مي‌توان نتايج كار ويتكه[۷] را با تحقيق حاضر نشان داد.

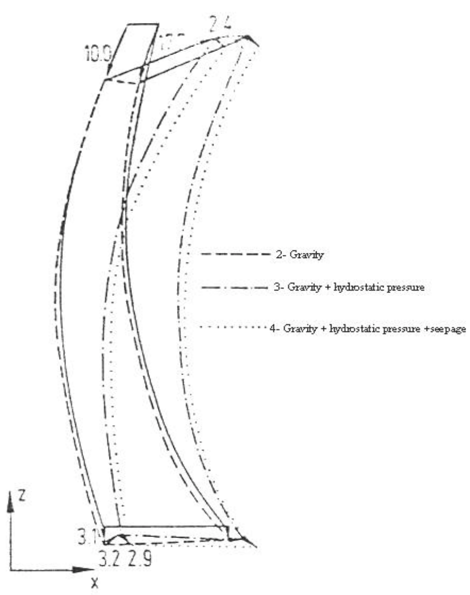
ويتكه سدي با ارتفاع ۱۲۰ متر و طول تاج ۳۰۰ متر را كه بر روي پي سنگي حاوي سه دسته درزه قرارگرفته است،مدل كرده و تحليل‌هايي بر روي اين سد با استفاده از نرم‌افزارهاي FEST03 و HYD03 انجام داده است. در جدول ۲ نتايج حاصل از كارهاي وي و تحقيق حاضر براي سنجش درستي مقايسه شده است. البته به جهت نبود اطلاعات هندسه سد وتكيه‌گاه در كار ويتكه در اينجا فقط به مقايسه نوع و درصد اثر اندركنش هيدرومكانيكال و نيز الگوي تغيير مكان بسنده شده است. تفاوت حاصله در نتايج ناشي از تفاوت در هندسه سد وتكيه‌گاه، مشخصات مكانيكي مصالح (به ويژه انعطاف پذيري زياد پي در تحقيق حاضر) و نحوه قرارگيري درزه‌ها در دو مدل مي‌باشد. همچنين مي‌توان به تفاوت نحوه مدلسازي رفتار مكانيكي (استفاده از مدل برتر چندلايه در اين بررسي) به عنوان يكي ديگر از منشاهاي اختلاف كوچك موجود نيز اشاره كرد.

جدول۲ مقايسه جابجايي حاصل از تحليل‌هاي انجام شده توسط ويتكه و طرح حاضر

نوع بارگذاري	كارهاي ويتكه	نتايج طرح حاضر
وزن+ فشار هيدرواستاتيک	۱۷,۷mm	٤۸,٦mm
وزن+ فشار هيدرواستاتيک+تراوش	۲٤mm	۷٥,٦mm
درصد افزايش جابجايي	%۳٦	%٥٥



الف



ب

شكل (۲۱) الگوي تغيير مكان طره مركزي تحت بارگذاري‌هاي مختلف الف- بدست آمده از **FEAP-HM** ب- از كارهاي ويتكه[۷]

۹- نتايج

در تحقيق حاضر به بررسي اثرات تراوش بر روي پايداري سدهاي بتني قوسي پرداخته شده است. تمرکز اين تحقيق با توجه به دامنه وسيع اثرات تراوش بر روي پايداري، متمرکز بر اندرکنش هيدرومکانيکال در توده‌سنگ درزه‌دار واقع در پي و تکيه‌گاه سدهاي بتني شده است. در ادامه نتايج حاصل از بررسي محدود صورت گرفته از اين تحقيق بيان مي‌شود:

۱- اگر توده سنگ پي و تکيه‌گاه در سدهاي بتني قوسي حاوي يک دسته درزه اصلي موازي محور سد باشند و پي سد بدون در نظر گرفتن اثرات تراوش در تکيه‌گاه مدل شود، مقدار اختلاف تنشهاي بدست آمده در بدنه نسبت به حالتي که تراوش در تکيه‌گاه مدل مي‌شود مي‌تواند ناچيز باشد. اين قضيه در مورد ميانگين تفاضل تنشهاي اصلي نيز صادق خواهد بود.

۲- اگر پي و تکيه‌گاه حاوي يک دسته درزه اصلي موازي محور سد باشد، زمانيکه اثر تراوش در تکيه‌گاه مدل نشود، مقدار تنشهاي حاصله در تکيه‌گاه نسبت به حالتيکه تراوش در تکيه‌گاه مدل مي‌شود، مي‌تواند بسيار ناچيز باشد. اين اختلاف در مورد ميانگين تفاضل تنشهاي اصلي بسيار فاحش بوده و در دسته درزه‌هاي با شيب ۳۰ تا ٦۰ درجه به سمت بالادست مي‌تواند به حدود ٤۰% بالغ گردد.

۳- اگر پي و تکيه‌گاه حاوي دو يا سه دسته درزه باشد (بدون شيب جانبي) در حالتيکه اثر تراوش در تکيه‌گاه مدل نشود مقدار تنشهاي حاصله در بدنه سد نسبت به حالتي که تراوش در تکيه‌گاه مدل شود، مي‌تواند کمتر گردد. اين اختلاف در صورت وجود درزه اصلي با شيب ٦۰ درجه به طرف پايين دست قابل توجه‌تر گشته است.

٤- اگر پي و تکيه‌گاه حاوي دو يا سه دسته درزه (بدون شيب جانبي) باشد در حالتي‌که اثر تراوش در تکيه‌گاه مدل نشود مقدار تنشهاي حاصله در تکيه‌گاه سد نسبت به حالتي که تراوش در تکيه‌گاه مدل شود، مي‌تواند بسيار کمتر وانمود گردد. بنابراين رعايت آن و نيز بررسي و مطالعه اندرکنش هيدرومکانيکال ديد واقع‌بينانه‌تري نسبت به تنش‌ها مي‌دهد.

۵- گرچه اهميت اندرکنش هيدرومکانيکال در صرف بدنه سد قوسي طي اين مطالعه اين مطالعه چندان قابل توجه نبوده است ليکن در تمام حالات اشاره شده عدم مطالعه و بررسي تراوش و يا اندرکنش ياد شده باعث تخمين ناصحيح و خلاف جهت اطمينان تنشها بويژه در تکيه‌گاه جانبي سد مي‌شود.

۱۰- مراجع

[۱] خندان بکاولي، محمد، اثر تراوش بر پايداري توده سنگ درزه دار در پي سدهاي قوسي، دانشگاه تربيت مدرس، ۱۳۸۳.

[۲] Cheng, H.L.; Fluid Flow in Discontinuous Rocks, Chapman & Hall, 1993.

[۳] Desai, C.S., Christian, J.T.; Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw-Hill, 1977.

[۴] Pande. G.N., Beer, G., Williams, J.R.; Numerical Methods in Rock Mechanics, John Wiley & Sons, 1990.

[۵] Priest, S.D.; Discontinuity Analysis For Rock Engineering, 1st Edition, Chapman & Hall, 1993.

[۶] Serafim, J.L.; Safety of Dams, Balkema, 1984.

[۷] Wittke, W.; Rock Mechanics: Theory and Application with Case Histories, Springer, 1990.

[۸] Zienkiewicz, O.C.; The Finite Element Method, 5th Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.

[۹] Barton, N., Bandis, B., Bakhtar, K., "Strength Deformation and Conductivity of Rock Joints", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 22(3), p.p. 121-140, 1985.

[۱۰] Duarte Azevedo, I.C., Vaz, L.E., Vargas, E.A., "A numerical procedure for the analysis of the hydromechanical coupling in fractured rock masses", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,Vol.22, No.3, pp.867-901, 1998.

[۱۱] Erban, P.J., Gell, K., "Consideration of the Interaction Between Dam and Bedrocks in a Coupled Mechanic-Hydraulic FE-program", Rock Mechanics & Rock Engineering, Vol. 21, p.p.99-117, 1988.

[۱۲] Londe, P., "The Malpasset Dam Failure", Engineering Geology, Vol. 24, p.p. 295-329, 1987.

[۱۳] Zienkiewicz, O.C., Pande. G.N., "Time Dependant Multilaminate model of Rocks-A Numerical Study of Deformation and Failure of Rock Masses", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 1, p.p.219-247, 1977.

[۱۴] http:// www.ce.berkeley.edu/~rlt/feap