

بررسی اثر تراوش بر پایداری توده سنگ درزه دار در تکیه‌گاه سدهای قوسی

محمد خندان بکاولی^۱؛ محمد تقی احمدی^۲؛ محمود یزدانی^۲

چکیده

تکیه‌گاه و پی از آسیب‌پذیرترین اجزاء سدهای قوسی شمرده می‌شود، بنابراین شناخت نقاط ضعف آنها از اولویتهای اصلی خواهد بود. با توجه به اینکه نیروهای حاصل از تراوش تأثیری بسیار زیادی بر پایداری تکیه‌گاه دارد، شناخت پدیده تراوش در ساختگاههای سنگی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. از مهمترین پدیده‌های موجود در تراوش از محیطهای توده‌سنگی، اندرکنش هیدرومکانیکال درزه‌ها می‌باشد که اثر این پدیده بر روی تکیه‌گاه سدها و به طور خاص تکیه‌گاه سدهای بتنی قوسی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق، با تدوین الگوریتم مناسب و مدل کردن توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل چندلایه پیوسته برای بیان رفتار مکانیکی و با فرض لایه‌ای بودن جریان تراوش در درزه سنگ‌ها و استفاده از قانون مکعب و مدل معادل و پیوسته آن در توده سنگ، اثر پدیده اندرکنش هیدرومکانیکال بر بازتوزیع تنش‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی، نشان دهنده موفقیت روش و همگرایی موثر چشمگیر آن بوده و تراوش و یا اندرکنش یادشده، تأثیر بسیار زیادی بر تنشهای اصلی و میانگین تفاضل تنشهای اصلی داشته و حتی در مورد تنش‌های برشی تکیه‌گاه به میزان ۴۰٪ اختلاف در نتایج مشاهده شده که بیانگر اهمیت این مطالعه می‌باشد.

کلمات کلیدی

سد قوسی، اندرکنش هیدرومکانیکال، 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 multilaminar 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.

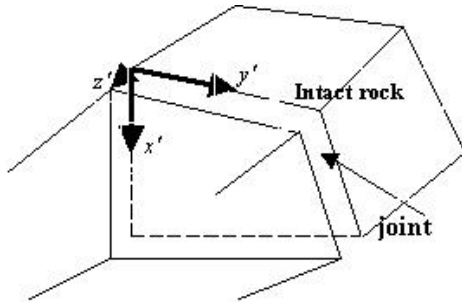
KEYWORDS

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

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس EMail: M_kh_Bakavoli@yahoo.com

^۲ عضو هیات علمی بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس EMail: MAhmadi@Modares.ac.ir

برای بدست آوردن ماتریس نفوذپذیری لازم است که سیستم مختصات محلی برای درزه‌ها تعریف شود. برای تعریف این سیستم مختصات محلی، مطابق شکل ۱، فرض شده است که محور z' عمود بر صفحه ناپیوستگی بوده و صفحه $x'y'$ منطبق بر صفحه ناپیوستگی باشد.



شکل (۱) چگونگی مختصات محلی

برای بدست آوردن بازشدگی هیدرولیکی از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۹]:

$$e_0 = \frac{JRC^{2.5}}{\left(\frac{e}{e_0}\right)^{2.5}} \quad (1)$$

که در آن JRC ضریب زبری بوده، e_0 بازشدگی هیدرولیکی و e بازشدگی مکانیکی می‌باشد. با توجه به سرعت پایین جریان در درزه، فرض می‌شود که جریان لایه‌ای بوده و فرض قانون مکعب درست خواهد بود [۲]. بنابراین نفوذپذیری دسته درزه‌ها در سیستم مختصات محلی را می‌توان به صورت رابطه ۲ بدست آورد:

$$k_{x'} = k_{y'} = \frac{e_0}{s} \cdot \frac{g \cdot e_0^2}{129} \quad (2)$$

که در رابطه ۲، s فاصله‌داری درزه‌ها در یک دسته درزه خاص، g شتاب ثقل زمین و θ ویسکوزیته سینماتیکی آب می‌باشد. دبی در واحد سطح را می‌توان از رابطه ۳ بدست آورد:

$$\mathbf{q}' = \begin{Bmatrix} q_{x'} \\ q_{y'} \\ q_{z'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & k_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_{x'} \\ I_{y'} \\ I_{z'} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

که در رابطه یاد شده، $I_{x'}, I_{y'}, I_{z'}$ گرادیان هیدرولیکی در مختصات محلی می‌باشد. برای اینکه بردار \mathbf{q}' را در سیستم مختصات کلی بتوان بدست آورد از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{K}_i' \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{I}' = \mathbf{K}_i \cdot \mathbf{I} \quad (4)$$

که ماتریس انتقال $[\mathbf{T}]$ در آن به صورت رابطه ۵ می‌باشد:

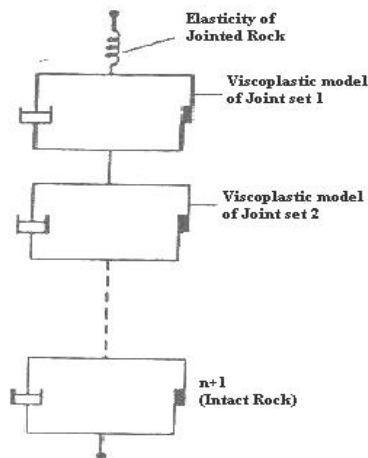
حوادث دنیای سدسازی همواره راهنمای خوبی برای مطالعه رفتار سدها و یافتن نقاط ضعف آنها و همچنین توانسته کمک شایانی به طراحان سد نموده تا در مورد پدیده‌هایی که در مطالعات آنها لحاظ نشده به جستجو و تحقیق بیشتر بپردازند. با نگاهی کوتاه به آمار می‌توان دریافت که یکی از شایع‌ترین دلایل شکست سدها مسائل مرتبط با پی و تکیه‌گاه به‌ویژه مشکلات مرتبط با پی سنگی سدهای قوسی می‌باشد [۶]. یکی از این حوادث تاریخی، شکست سد مالپاسه در فرانسه به سال ۱۹۵۹ می‌باشد.

در کوله چپ این سد، جایی که نیروی حاصل از سد به پی وارد می‌شود این نیرو به موازات لایه‌بندی اعمال گردیده، عاملی برای نفوذ حباب تنش در عمق شده است. با توجه به حساسیت نفوذپذیری در آن منطقه نسبت به تنش باعث پدیدار شدن ناحیه‌ای با نفوذپذیری بسیار پائین شده که این خود بالا رفتن فشار آب حفره‌ای به اندازه حد کامل هیدرواستاتیکی سد را در پی داشته و با توجه به وجود گسل پائین‌دست گوه گسیختگی تشکیل و درپایان منجر به شکست سد شده است [۱۲]. با توجه به طبیعت بسیار پیچیده تراوش در توده سنگ درزه‌دار و حساسیت نفوذپذیری توده سنگ نسبت به تنش، ضرورت مدل کردن پدیده تراوش در توده سنگ درزه‌دار به خصوص بررسی اثر اندرکنش هیدرومکانیکال بر چگونگی توزیع تنشها نسبت به حالتی که تنشها بدون اثر تراوش در تکیه‌گاه محاسبه می‌شوند، حس می‌گردد. در این تحقیق سعی بر آن شده تا با آنالیز توام مکانیکی هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار در پی و تکیه‌گاه سدهای بتنی تغییرات توزیع تنش مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- رفتار هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار

برای بررسی تراوش در توده سنگ درزه‌دار از دو مدل تراوش همگن و گسسته می‌توان استفاده کرد. در مدل تراوش همگن، همانند تراوش از خاک، فرض می‌شود از کل مقطع مورد نظر تراوش صورت می‌پذیرد. در این تحقیق با فرض مدل همگن پیوسته و جریان تراوش از درزه‌سنگها و لایه‌ای بودن جریان در درزه سنگها رفتار هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار شبیه سازی شده است. از آنجا که بازشدگی مکانیکی را نمی‌توان برای محاسبه نفوذپذیری بکار برد از مفهومی بنام بازشدگی هیدرولیکی که توسط بارتون و همکارانش ارائه شده است، استفاده گردید.

کردن لغزش، باز و بسته شدن چندین سری دسته درزه می‌باشد. مدل فیزیکی چندلایه مطابق شکل ۲، شامل یک فنر برای مدلسازی رفتار ارتجاعی سنگ بکر و تعدادی واحد ویسکوپلاستیک برای مدلسازی دسته درزه‌ها می‌باشد.



شکل (۲) مدل فیزیکی مدل چند لایه [۱۳]

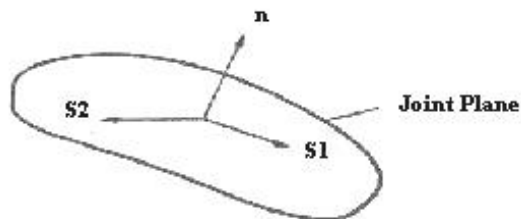
فرضیات این مدل عبارتند از:

- ۱- تمام درزه‌های یک سری پیوسته، موازی و بدون پرتشگی فرض می‌شوند.
- ۲- فاصله درزه‌ها در یک سری یکنواخت و خیلی کوچکتر از ابعاد سازه‌ای است که باید تحلیل شود.

شایان گفتن است که تمامی تحلیلها در این پژوهش با فرض نداشتن تسلیم درزه‌سنگها در محیط انجام شده و تمامی آنها به صورت ارتجاعی خطی باقی مانده‌اند.

۴- ماتریس الاستیسیته توده سنگ درزه‌دار [۴]

مطابق شکل ۳ با فرض تنشها $\sigma_n, \tau_{s1}, \tau_{s2}$ و تغییرمکانهای مشابه آنها $\delta_n, \delta_{s1}, \delta_{s2}$ رابطه بین تنشها و تغییرمکانهای نسبی به صورت رابطه ۱۴ می‌باشد:



شکل (۳) سیستم مختصات محلی برای یک درزه

که در آن D^J یک ماتریس سختی 3×3 بوده و $\sigma^T = [\sigma_n, \tau_{s1}, \tau_{s2}]$ بردار تنش در سیستم مختصات محلی می‌باشد. اگرچه ماتریس سختی در بازه تنشهای وارده ثابت

$$[T] = \begin{bmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & -\sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & -\cos \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه ۵، α زاویه امتداد و β زاویه شیب دسته درزه i می‌باشد. حال اگر n دسته درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، ماتریس نفوذپذیری معادل برای توده سنگ به صورت رابطه ۶ بدست می‌آید [۷].

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \quad (6)$$

پس از تعریف خصوصیات هیدرولیکی توده سنگ اکنون نوبت به بازنویسی معادلات اجزاء محدود مسئله می‌رسد.

معادله حاکم تراوش در یک مسئله سه بعدی برای حالت

پایدار به صورت رابطه ۷ نوشته می‌شود:

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + Q = 0 \quad (7)$$

در رابطه ۷، Q مقدار جریان عبوری در واحد زمان و ϕ تابع پتانسیل تراوش می‌باشد. رابطه ۷ را به صورت رابطه ۸ می‌توان بازنویسی کرد:

$$\nabla^T K \nabla \phi(x, y, z) + Q = 0 \quad \text{روی حجم } \Omega \quad (8)$$

با تعریف شرایط مرزی مسئله تراوش به صورت رابطه ۹ نوشته می‌شود:

$$\phi = \bar{\phi} \quad \text{روی } \Gamma_\phi \quad (9)$$

$$q_n = q_p \quad \text{روی } \Gamma_q \quad (10)$$

که در رابطه ۹ و ۱۰، $\bar{\phi}$ ثابت، مقدار دبی خروجی از مرز Γ_q می‌باشد. با استفاده از روش اجزاء محدود برای حل مسئله یاد شده معادله دیفرانسیل رابطه ۸ به رابطه ساده ۱۱ تبدیل خواهد شد:

$$\bar{K} \bar{\phi} = \bar{F} \quad (11)$$

که در آن:

$$\bar{F} = \int_{\Omega} N^T Q d\Omega + \int_{\Gamma_q} N^T q_p d\Gamma \quad (12)$$

$$\bar{K} = \int \nabla^T N K \nabla N d\Omega \quad (13)$$

که N تابع شکل و \bar{K} ماتریس نفوذپذیری می‌باشد [۸].

۳-۳- رفتار مکانیکی توده سنگ درزه‌دار

با توجه به استفاده از مفهوم محیط معادل در توده سنگ درزه‌دار، در تحقیق حاضر از مدل ارائه شده چندلایه توسط زینکوویچ و پاند [۱۳]، استفاده می‌شود. این مدل که بر اساس تئوری الاستوویسکوپلاستیسیته بیان شده است، قادر به مدل

$$\varepsilon^{rm} = \varepsilon^{lr} + \varepsilon^j = C^{lr} \sigma + C^* \sigma = (C^{lr} + C^*) \sigma \quad (22)$$

$$\Rightarrow \sigma = (C^l + C^*)^{-1} \varepsilon^{rm} = D^{rm} \varepsilon^{rm}$$

بنابراین ماتریس الاستیسیته توده سنگ درزه‌دار به صورت رابطه ۲۳ بدست می‌آید:

$$D^{rm} = [C^{lr} + \sum_{m=1}^n f_m T_m^T C_m^J T_m]^{-1} \quad (23)$$

در عمل n کمتر از ۵ بوده و اگر بیشتر از ۵ سری دسته درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، ناهمسانی که از دسته درزه‌ها بوجود می‌آید از بین رفته و توده سنگ به صورت همسان رفتار می‌کند.

۵- معادلات اجزای محدود برای تنش موثر

با توجه به اینکه محیط تکیه‌گاه و پی سد اشباع در نظر گرفته می‌شود، ارتباط بین میدان تنش و میدان جریان تراوش با مفهومی بنام تنش موثر σ' بیان می‌شود. تنش کل σ با رابطه ۲۴ به تنش موثر تبدیل می‌گردد:

$$\sigma = \sigma' - mp \quad (24)$$

که در آن

$$p = \gamma_w (\phi - z) \quad (25)$$

$$m^T = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (26)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma'_{xx} - \gamma_w (\phi - z), \quad \tau_{xy} = \tau'_{xy} \quad (27)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma'_{yy} - \gamma_w (\phi - z), \quad \tau_{xz} = \tau'_{xz} \quad (28)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma'_{zz} - \gamma_w (\phi - z), \quad \tau_{yz} = \tau'_{yz} \quad (29)$$

که در معادلات بالا γ_w وزن مخصوص آب و p فشار است. با نوشتن معادلات تعادل مکانیکی برای یک المان بی‌نهایت کوچک سه بعدی به دست خواهد آمد:

$$A(u) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} - \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \tau'_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau'_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial y} - \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \tau'_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau'_{yz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} - \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial z} + \gamma_w + \frac{\partial \tau'_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau'_{yz}}{\partial y} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} b_x \\ b_y \\ b_z \end{array} \right\} = 0 \quad (30)$$

که در آن $b = [b_x \ b_y \ b_z]^T$ نیروی حجمی می‌باشد. پس از حل معادلات دیفرانسیلی ۳۰ با استفاده از روش اجزاء محدود معادلات تعادل به صورت رابطه ۳۱ نوشته خواهد شد [۸]:

نمی‌باشد، اما اگر توجه معطوف به رفتار الاستیک گردد، این اعضا را می‌توان ثابت فرض نمود. علاوه بر آن، جمله‌های غیر قطری را نیز صفر در نظر گرفته و برای ساده سازی بیشتر فرض می‌شود که $D_{s1}^J = D_{s2}^J = D_s^J$. بنابراین شکل ساده شده رابطه ۱۵ که در مسائل عملی استفاده می‌شود عبارت است از:

$$D^J = \begin{bmatrix} D_n^J & 0 & 0 \\ 0 & D_s^J & 0 \\ 0 & 0 & D_s^J \end{bmatrix} \quad (15)$$

و ماتریس نرمی یک درزه به صورت رابطه ۱۶ نوشته می‌شود:

$$\delta = C^J \sigma \quad (16)$$

$$C^J = [D^J]^{-1} \quad (17)$$

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

$$C_m^{JS} = f_m C_m^J \quad (18)$$

که در آن C_m^{JS} ماتریس نرمی دسته درزه m ام و f_m فراوانی درزه‌ها در دسته درزه m ام می‌باشد. با توجه به اینکه این ماتریس نرمی در سیستم مختصات محلی تعریف شده است. با استفاده از رابطه ۱۹ به مختصات کلی جابجا می‌گردد:

$$C_m^{JSG} = f_m T_m^T C_m^J T_m \quad (19)$$

که C^{JSG} ماتریس نرمی سری درزه در مختصات کلی است و T در اینجا ماتریس انتقال ۳×۶ می‌باشد و با استفاده از زوایای امتداد (α) و شیب درزه (β) قابل محاسبه است:

$$T_m^T = \begin{bmatrix} \sin^2 \beta \cos^2 \alpha & -\frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin \beta & -\frac{1}{2} \cos^2 \alpha \sin 2\beta \\ \sin^2 \beta \sin^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin \beta & -\frac{1}{2} \sin^2 \alpha \sin 2\beta \\ \cos^2 \beta & 0 & \frac{1}{2} \sin 2\beta \\ -\sin^2 \beta \sin 2\alpha & -\sin \beta \cos 2\alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin 2\beta \\ -\sin \alpha \sin 2\beta & -\cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos 2\beta \\ \cos \alpha \sin 2\beta & -\sin \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \cos 2\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

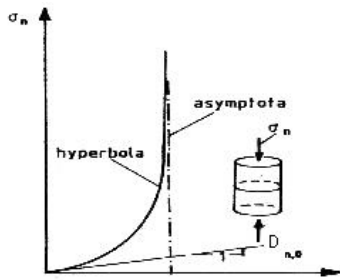
اگر n سری درزه وجود داشته باشد نرمی کل بصورت رابطه ۲۱ بدست می‌آید.

$$C^* = \sum_{m=1}^n C_m^{JSG} \quad (21)$$

کرنش کلی در توده سنگ حاصل جمع کرنشهای سنگ سالم و کرنشهای مربوط به سری درزه‌ها می‌باشد یعنی:



که تنش بدست آمده با ماتریس انتقال \bar{T} به سیستم مختصات محلی منتقل می‌گردد.



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

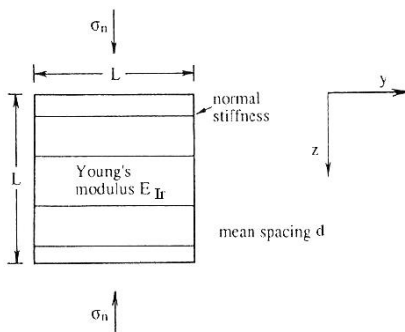
$$\{\sigma'\} = [\bar{T}]\{\sigma\} \quad (۳۳)$$

$$[\bar{T}] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & 0 & 2l_1m_1 & 0 & 0 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & 0 & l_1m_2 + l_2m_1 & m_1n_2 & n_2l_1 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + l_3m_2 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & 0 & l_1m_3 + l_3m_1 & m_1n_3 & n_3l_1 \end{bmatrix} \quad (۳۴)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} l_1 &= \sin \alpha & m_1 &= \cos \alpha & n_1 &= 0 \\ l_2 &= \cos \alpha \cos \beta & m_2 &= -\sin \alpha \cos \beta & n_2 &= -\sin \beta \\ l_3 &= -\cos \alpha \sin \beta & m_3 &= \sin \alpha \sin \beta & n_3 &= -\cos \beta \end{aligned}$$

اما در حالتی که درزه‌ها در معرض تنش کششی قرار گیرند و با توجه به اینکه مشابه شکل ۴ دیگر رابطه‌ای (به مانند آزمایشهای فشاری که بر روی سنگها انجام شده است) نباشد، با استفاده از مفهوم معادل و روابط بعدی ارتباط بین تغییرات اندازه دهانه درزه‌ها نسبت به تنش کششی بدست خواهد آمد [۵].



شکل (۵) نمونه مکعبی با یک دسته درزه [۵]

شکل ۵، نمایش مقطعی از یک نمونه مکعبی سنگی با طول L است که یک دسته درزه افقی، با فاصله داری d ، آنرا قطع کرده است. با توجه به فاصله‌داری گفته شده تعداد درزه‌هایی که مقطع سنگی به ضخامت L را قطع می‌کند برابر L/d می‌باشد. با فرض ارتجاعی بودن سنگ بکر با مدول الاستیسیته

$$\begin{aligned} & \int B^T D^{rm} B dv \cdot a - \int N^T b dv - \int N^T t d\Gamma \\ & - \int B^T D^{rm} \epsilon_0 dv - \int B^T \sigma_0' dv - \int N^T n \gamma_w dv + \int N^T \gamma_w i dv = 0 \end{aligned} \quad (۳۱)$$

که D^{rm} ماتریس الاستیسیته معادل توده سنگ بوده، ϵ_0 کرنش اولیه، σ_0' تنش اولیه، B ماتریس انتقال کرنش، N تابع شکل و a و $i^T = \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]$ و $n^T = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ بردار مقادیر گرهی جابجایی است.

همانطور که از رابطه ۳۱ پیدا است حلقه ارتباطی فضای تنش با میدان جریان تراوش آخرین عبارت رابطه یادشده می‌باشد. به این ترتیب که ابتدا مسئله تراوش حل شده و گرادیان هیدرولیکی i بدست می‌آید. سپس نیروهای تراوش از مسئله تراوش محاسبه شده و با حل معادله ۳۱ جابجایی‌ها و در پایان، تنشهای موثر بدست می‌آیند. با استفاده از این تنشها و روابط تغییر شکلی درزه‌ها، بازشدگی‌ها تصحیح و نفوذپذیری جدید بدست می‌آید. با در نظر گرفتن این نفوذپذیری ها مسئله تراوش دوباره حل شده و نیروها بدست آمده و تنشها تصحیح می‌شوند. این عملیات تا برآورده شدن ضوابط همگرایی ادامه پیدا می‌کند (نمودار جریانی شکل ۷) [۱۰]. شایان گفتن است که به علت پیچیدگی زیاد فرمولبندی‌ها و ایجاد ماتریسهای نامتقارن و افزایش چشمگیر زمان حل، روش حل مستقیم و به صورت درگیر coupled قابل توصیه نبوده و در این موارد روش تکرار گفته شده موفق، سریع و موثرتر است. [۸].

۶- محاسبه بازشدگی (بسته‌شدگی) دهانه درزه‌ها:

برای بیان اندرکنش لازم است که مشخص شود تحت اثر تنش‌های وارده چه تغییراتی در بازشدگی (بسته‌شدگی) دهانه درزه‌های موجود در توده سنگ اتفاق می‌افتد. برای تغییرات دهانه درزه‌ها (بسته شدگی) با فرض برقرار بودن قانون هذلولی گودمن از رابطه ۳۲ استفاده می‌شود [۱۱]:

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

که در رابطه ۳۲، σ_n' تنش نرمال روی صفحه ناپیوستگی، $D_{n,0}^J$ سختی اولیه درزه مطابق شکل ۴، e_i اندازه دهانه درزه قبلی، e_{new} اندازه دهانه درزه تحت اثر تنش و μ پارامتر ثابت بوده که از آزمایش بدست می‌آید. حال با استفاده از رابطه ۱ بازشدگی مکانیکی به بازشدگی هیدرولیکی مرتبط می‌شود. از آنجا که مسئله در سیستم مختصات کلی حل می‌شود لازم است

E_{ir} ، کرنش کلی نمونه فوق تحت اثر تنش کششی برابر:

$$\varepsilon^{rm'} = \varepsilon^{ir'} + \varepsilon^{j'} \quad (35)$$

که در آن $\varepsilon^{rm'}$ کرنش کلی توده سنگ، $\varepsilon^{ir'}$ کرنش سنگ بکر، $\varepsilon^{j'}$ کرنش ناشی از بازشدگی درزه‌ها در مختصات محلی می‌باشد.

$$\Delta l = \frac{\sigma_n'}{E_{Ir}}(L - e_{new}) + \frac{L}{d} \cdot \frac{\sigma_n'}{D_{tension}} \quad (36)$$

که در رابطه ۳۶، σ_n' تنش نرمال در صفحه ناپیوستگی و $D_{tension}$ سختی کششی درزه سنگها را نمایش می‌دهد. با فرض $L - e_{new} \cong L$ و تعریف ضریبی به نام θ به صورت رابطه ۳۷ به دست خواهد آمد:

$$\theta = \frac{\varepsilon_{Ir}'}{\varepsilon_j} = \frac{\frac{\sigma_n'}{E_{Ir}}}{\frac{\sigma_n'}{D_{tension} \cdot d}} = \frac{D_{tension} \cdot d}{E_{Ir}} \Rightarrow \varepsilon^{rm'} = \theta \varepsilon^{j'} + \varepsilon^{j'} \quad (37)$$

$$\varepsilon^{j'} = \frac{\varepsilon^{rm'}}{1 + \theta} \Rightarrow \frac{e_{new}}{d} = \frac{\varepsilon^{rm'}}{1 + \theta} \quad (38)$$

برای بدست آوردن کرنش با توجه به اینکه مسئله در سیستم مختصات کلی حل می‌شود باید از ماتریس انتقال، رابطه ۳۹، برای بدست آوردن کرنش در سیستم مختصات محلی استفاده کرد.

$$\{\varepsilon'\} = [D']^{-1} \{\sigma'\} = [D']^{-1} [\bar{T}] \{\sigma\} \quad (39)$$

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

۷- چگونگی پیدا کردن سطح تراوش

برای کامل شدن این الگوریتم، در برنامه توسعه داده شده توسط نویسندگان و بر اساس FEAppv [۱۴] تحت عنوان برنامه FEAP-HM، با استفاده از الگوریتم دسای [۲] اقدام به شناسایی سطح تراوش کرده تا بتوان به کمک آن مناطق خشک را از مناطق اشباع تمیز داده و نیروهای حاصل از تراوش را در آن به طور دقیق‌تر لحاظ کرد. تابع پتانسیل توسط رابطه ۴۰ بدست می‌آید.

$$\varphi = z + \frac{p}{\gamma} \quad (40)$$

مقدار پتانسیل بر روی نقاط واقع بر روی سطح تراوش برابر هد ارتفاعی می‌باشد. این مطلب مشابه آنست که گفته شود هد ناشی از فشار آب روی این نقاط صفر می‌شود. الگوریتم دسای با شناسایی نقاطی که مقدار تابع پتانسیل روی آنها از ارتفاع

آنها کمتر می‌باشد، یعنی اینکه دارای هد ارتفاعی منفی می‌باشند شناسایی کرده و با حذف سهم آنها در ماتریس \bar{K} در رابطه ۱۱ دوباره معادله یاد شده را حل کرده و پتانسیل‌های گرهی جدیدی حاصل می‌شود. با کنترل دوباره باز هم نقاط واقع در بالای سطح تراوش شناسایی و تا آخرین المان ادامه می‌یابد. الگوریتم شناسایی سطح تراوش در برنامه FEAP-HM از نمودار جریانی شکل ۶ استفاده می‌شود.

در نمودار جریانی مورد اشاره k شمارشگر نقاط گرهی هر المان (در تحقیق حاضر المانها ۸ گرهی هستند) می‌باشد. m شمارشگر تشخیص تعداد نقاط گرهی بالای سطح تراوش هر المان است. در صورتی که $m=8$ باشد این المان در بالای سطح تراوش بوده و باید سهم آن از ماتریس \bar{K} حذف گردد. n شمارشگری است که تعداد تکرار برای شناسایی سطح را بدست می‌دهد.

به این ترتیب از آنجا که برنامه FEAppv قابلیت مدلسازی رفتار توده سنگ درزه‌دار را نداشته است در این تحقیق، این قابلیت به همراه مدل رفتاری چندلایه و تراوش در توده سنگ به برنامه اضافه شده است. الگوریتم کلی حل مسئله با استفاده از برنامه FEAP-HM به صورت شکل ۷ خواهد بود.

۸- مدل بدنه و تکیه‌گاه سد قوسی [۱]

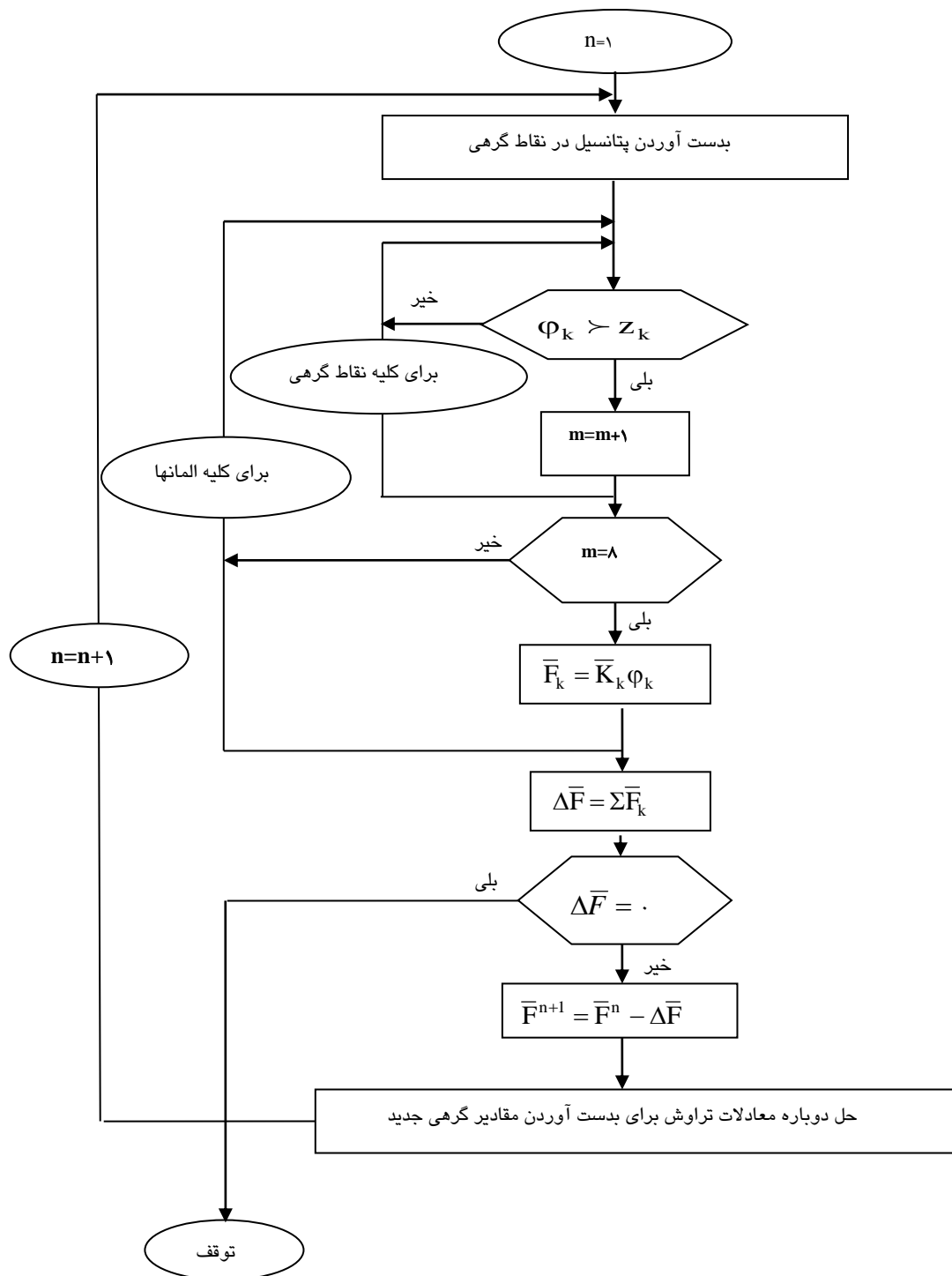
برای تولید هندسه سد و تکیه‌گاه از مشخصات سد قوسی ماروپوینت (Morrow Point) استفاده شده است. تراز تاج سد از کف مخزن برابر ۱۴۱.۷۳ متر، طول تاج ۲۲۰.۶۷ متر، عرض تاج ۳.۶۶ متر و در پی برابر ۱۵.۸۵ متر می‌باشد. هندسه سد به صورت متقارن مدل شده است. برای در نظر گرفتن اثرات متقابل بدنه و پی به اندازه ۱۵۰ متر از کف مخزن به عنوان پی در نظر گرفته شده است. تکیه‌گاه به اندازه ۱۰۰ متر در بالادست و به اندازه ۲۵۰ متر در پایین دست مدل شده است. با توجه به امتدادها و شیب‌های مفروض برای سه تیپ درزه‌ای که در پی در نظر گرفته شده می‌توان مسئله را به صورت متقارن تحلیل کرد و بنابراین نیمی از مدل برای تحلیل استفاده شده است. البته باید توجه داشت در صورت وجود درزه‌هایی با زاویه شیب به طرف داخل دره مسئله نامتقارن شده و باید مدل به صورت کامل تحلیل شود.

۳۰ المان خطی آجری ۸ گرهی برای مدل کردن بدنه سد و ۳۸۰ المان آجری گرهی با مدل رفتاری چند لایه برای مدل کردن پی و تکیه‌گاه استفاده شده است. تعداد ۶۰۱ گره کل بدنه سد و تکیه‌گاه را تشکیل می‌دهند. تراز سطح آب در مدل برابر با رقوم تاج سد در نظر گرفته شده است. قبل از آبیگری سطح آب

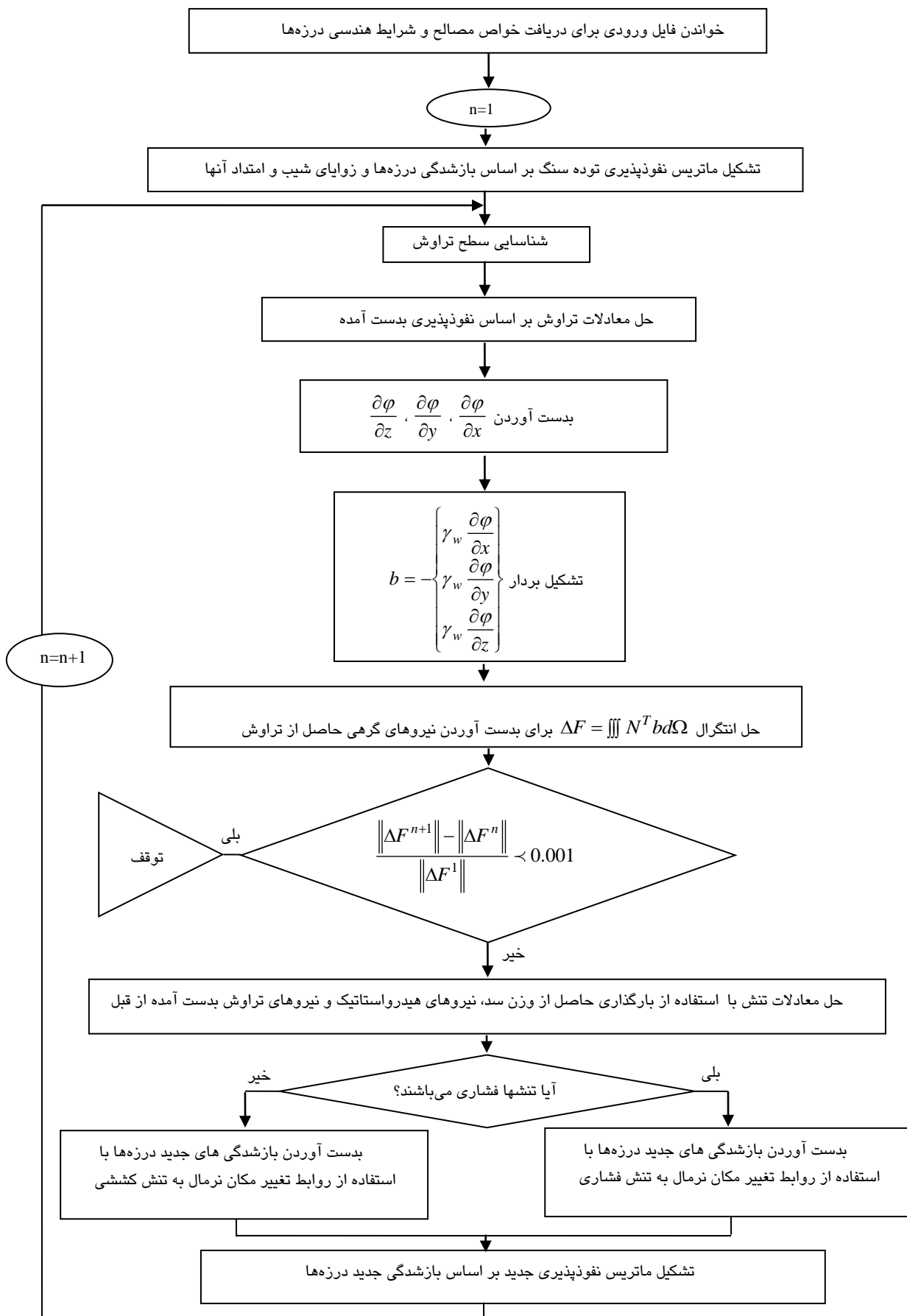


تا حد امکان ضعیف فرض شده تا بتوان با افزایش تغییر مکان، تاثیر روی آبگذرانی و رفتار هیدرولیکی را افزوده و از این طریق اندرکنش هیدرومکانیکال پررنگ‌تر دیده شود. با این وجود رفتار سنگ را می‌توان با دقت خوبی خطی در نظر گرفت.

زیرزمینی در تراز کف دره بوده است. برای بررسی اثر اندرکنش هیدرومکانیکال روی چگونگی توزیع تنشها از سه تیپ دسته درزه استفاده شده است. مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. این مشخصات



شکل (۶) الگوریتم جریانی چگونگی شناسایی سطح تراوش در برنامه FEAP-HM

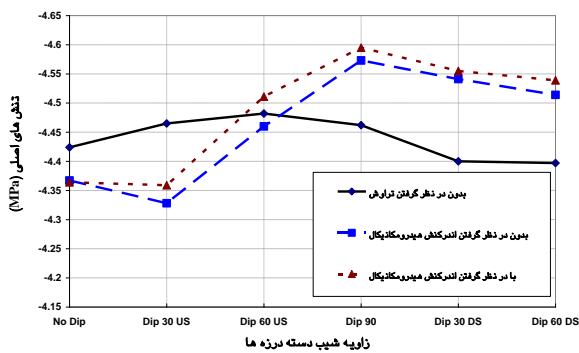


شکل (۷) الگوریتم جریانی چگونگی برای محاسبه اندرکنش هیدرومکانیکال در برنامه FEAP-HM

۸-۱- تکیه‌گاه با یک دسته درزه

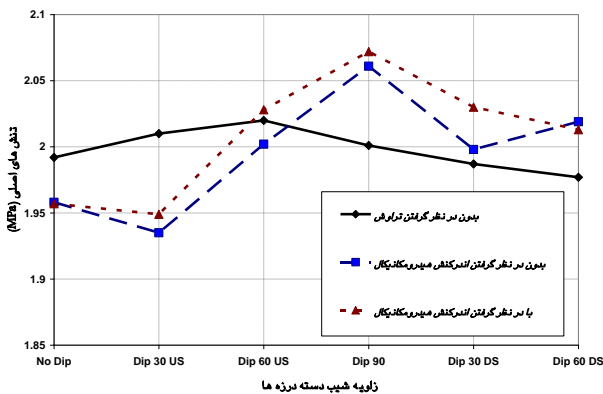
تکیه‌گاه و پی حاوی یک دسته درزه است. امتداد این دسته درزه به موازات محور سد بوده و زاویه شیب به سمت بالادست و پایین‌دست جهت مطالعه و بررسی قابل تغییر می‌باشد.

نتایج حاصل از بازتوزیع تنشها برای حالت مختلف از زاویه شیب دسته درزه‌ها به صورت مقایسه حداکثر تنشهای اصلی و بیشینه تنشهای برشی در بدنه و تکیه‌گاه سد، برای حالات بدون در نظر گرفتن اثر تراوش هیدرومکانیکال و با در نظر گرفتن تراوش بدون اثر اندرکنش هیدرومکانیکال و با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیکال مطالعه شده و نتایج ترسیم شده است.



شکل (۹) مقایسه حداکثر تنشهای اصلی در بدنه سد

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که اثر مدلسازی تراوش و اندرکنش هیدرومکانیکال تاثیر زیادی بر توزیع تنشها در بدنه سد نخواهد داشت. شایان گفتن است که کلیه مقادیر تنشهای بیشینه در تراز ۷۳ متری مجاور تکیه‌گاه در پایاب اتفاق افتاده است که با توجه به المان‌بندی سد در محدوده ۲/۳ میانی به لحاظ ارتفاعی قرار می‌گیرد.

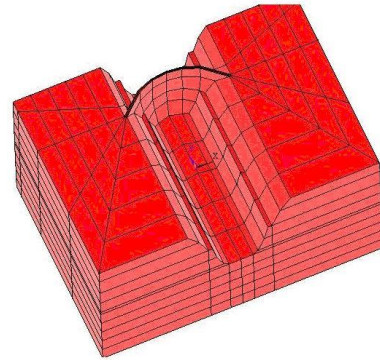


شکل (۱۰) مقایسه بیشینه تنشهای برشی در بدنه سد

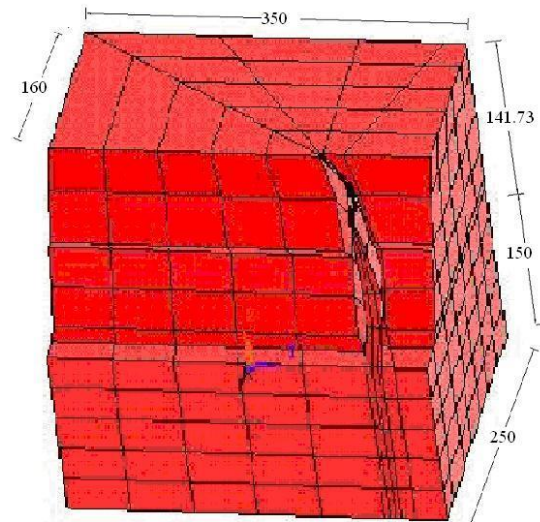
همانطور که در شکل ۱۰ هم مشاهده می‌شود بازهم اثر تراوش تاثیر زیادی بر بازتوزیع تنشهای برشی در بدنه سد

جدول ۱- خواص مصالح

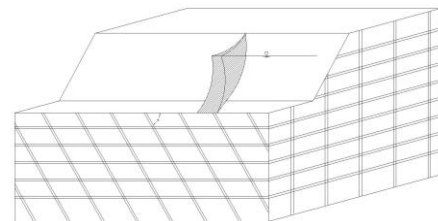
سیال	دسته درزه سنگ	سنگ بکر	بتن
$\rho_{wat} = 1000 \text{ kg/m}^3$	$D_n = 50000 \text{ MPa/m}$	$E_{fr} = 3 \text{ GPa}$	$E_{con} = 20 \text{ GPa}$
$\theta_{wat} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_s = 25000 \text{ MPa/m}$	$\nu = 0.25$	$\nu = 0.2$
$g = 9.8 \text{ lm/s}^2$	$JRC = 5$		$\gamma_{con} = 2500 \text{ kg/m}^3$
	$D_{n,i} = 10000 \text{ MPa/m}$		
	$D_{tens} = 10000 \text{ MPa/m}$		
	$\mu = 0.5$		
	$d = 0.3 \text{ m}$		



الف



ب



ج

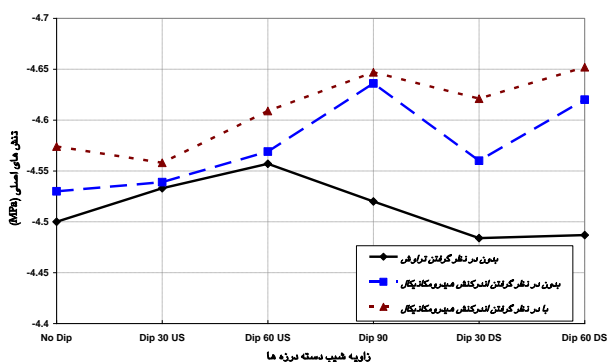
شکل (۸) المان بندی هندسه سد و تکیه‌گاه و قرارگیری درزه‌ها
الف- مدل کامل ب- مدل المان محدود استفاده شده در تحلیل به علت
تقارن ج- مدل شماتیک درزه‌ها

نمی‌گذارد.

درزه‌ها مطابق جدول ۱ می‌باشد.

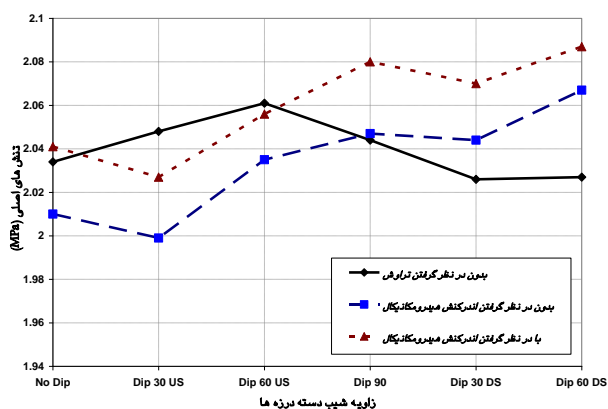
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دیده می‌شود که اثر تراوش در تکیه‌گاه بر روی تنش‌های بوجود آمده در بدنه سد و همچنین بیشینه تنش‌های برشی در مقایسه با حالت مدل نمودن تکیه‌گاه بدون در نظر گرفتن نیروهای تراوش، زیاد نیست.

اما باز هم در پاره‌ای از موارد این اختلاف قابل ملاحظه می‌شود. مطابق آنچه در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در حالتی که دسته درزه اول دارای زاویه شیب ۳۰ و ۶۰ درجه به طرف پایین دست باشد، اختلاف قابل توجهی در تنش‌های موجود در بدنه سد در حالتی که تراوش در تکیه‌گاه‌ها مدل شده نسبت به حالتی که تراوش در تکیه‌گاه مدل نشده است، مشاهده می‌گردد.



شکل (۱۳) مقایسه حداکثر تنش‌های اصلی در بدنه سد

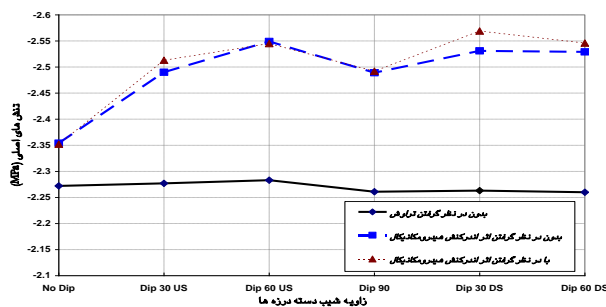
در شکل ۱۵ نشان داده شده است که اگر نیروهای حاصل از تراوش در تکیه‌گاه در مدلسازی وارد نگردند، تنش‌های حاصل در تکیه‌گاه در مقایسه با حالتی که این نیروها در نظر گرفته می‌شوند، بسیار پایین‌تر می‌باشد. این نکته در بردارنده این واقعیت است که تراوش اثر بسزایی بر تنش‌ها در تکیه‌گاه می‌گذارد، بر خلاف آنچه در مورد وضعیت تنش‌ها در بدنه سد مشاهده گردید.



شکل (۱۴) مقایسه بیشینه تنش‌های برشی در بدنه سد

در شکل ۱۶ به خوبی اختلاف بین بیشینه تنش‌های برشی در

در مورد تنش‌های بوجود آمده در تکیه‌گاه دیگر نمی‌توان از این اثرات چشم‌پوشی کرد. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تنش‌های اصلی در تکیه‌گاه در حالتی که تراوش در تکیه‌گاه‌ها مدل نشده است بسیار کمتر از حالتی است که تراوش در تکیه‌گاه‌ها منظور شده باشد. علاوه بر آن اثر اندرکنش هیدرومکانیکال بر تنش‌های بوجود آمده در مقایسه با حالتی که این اثر در نظر گرفته نشده است نیز جلب نظر می‌نماید.



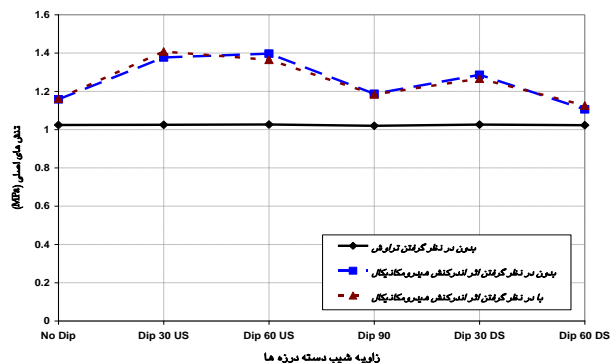
شکل (۱۱) مقایسه حداکثر تنش‌های اصلی در تکیه‌گاه

در شکل ۱۲ بیشینه تنش‌های برشی در تکیه‌گاه سد نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیدا است، بدون منظور کردن اثر تراوش در تکیه‌گاه‌ها، تنش برشی در سطح پایین‌تری از تنش‌های واقعی قرار می‌گیرد. از آنجا که اختلاف نزدیک ۴۰٪ وجود دارد، ندیده گرفتن اثر تراوش موجب تحلیل بسیار غیر ایمن از رفتار پی خواهد بود. اثر اندرکنش هیدرومکانیکال نیز در این مورد ناچیز است.

۸-۲- تکیه‌گاه با دو دسته درزه

تکیه‌گاه و پی حاوی دو دسته درزه بوده، امتداد دسته درزه اول همانند قبل به موازات محور سد بوده و زاویه شیب متغیر می‌باشد.

دسته درزه دوم دارای امتداد عمود بر محور سد (واقع در صفحه XZ) و دارای زاویه شیب ۹۰ درجه نسبت به افق می‌باشد.

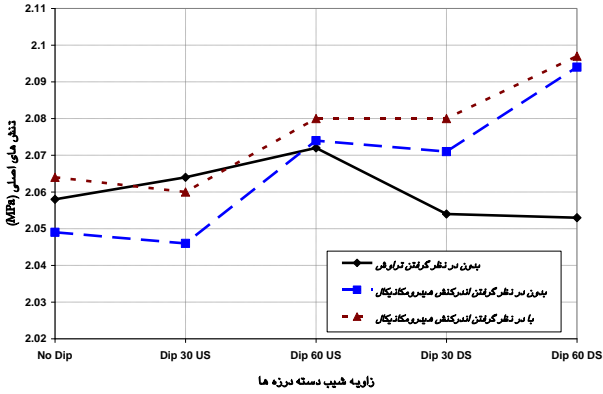


شکل (۱۲) مقایسه بیشینه تنش‌های برشی در تکیه‌گاه

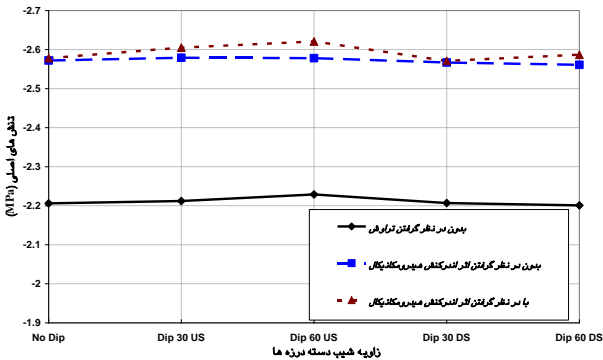
غیر از زوایای امتداد و شیب، سایر مشخصات کلیه دسته



که دسته درزه دارای شیب ۳۰ و ۶۰ درجه به طرف پایین دست باشد، اختلاف قابل توجهی در تنش‌های بوجود آمده در بدنه سد مشاهده می‌گردد. اثر اندرکنش هیدرومکانیکال مقادیر تنش بیشتری نسبت به حالت منظور نشدن اندرکنش، بدست می‌دهد که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ دیده می‌شود.



شکل (۱۷) مقایسه حداکثر تنش‌های اصلی در بدنه سد



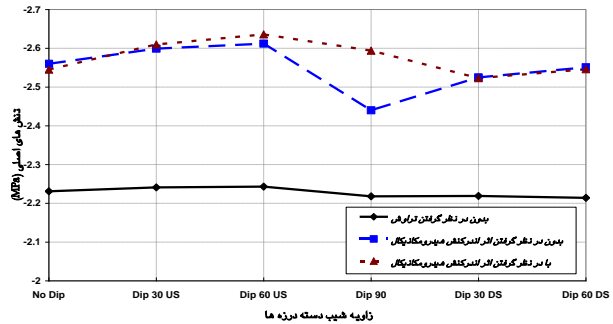
شکل (۱۸) مقایسه بیشینه تنشهای برشی در بدنه سد

در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که حداکثر تنش اصلی اتفاق افتاده در حالتی که تراوش در مدل وارد نشده است نسبت به حالتی که تراوش در تکیه‌گاه در مدلسازی وارد می‌شود، بسیار کمتر است و این نشان دهنده اثر قابل اعتنا تراوش بر روی توزیع تنش‌ها در تکیه‌گاه می‌باشد. در مورد مقایسه توزیع بیشینه تنشهای برشی در تکیه‌گاه نیز این قضیه درست خواهد بود. باید توجه شود که این میانگین از معیارهای مقاومت به حساب می‌آید و این اختلاف ۲۰٪ نشان داده شده در شکل ۲۰ بسیار قابل توجه می‌باشد.

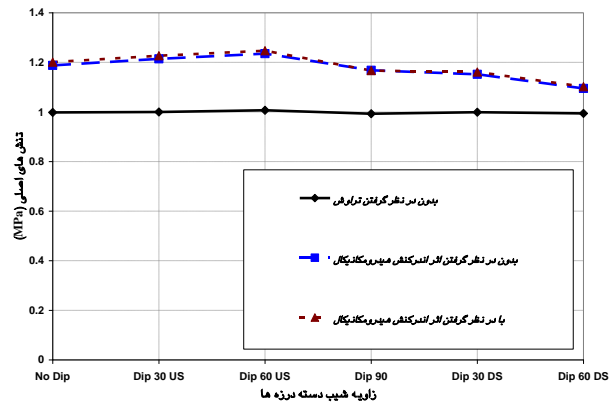
تکیه‌گاه در حالتی که تراوش در تکیه‌گاه مدل نشده و در حالتی که در مدلسازی وارد می‌شود، نشان داده شده است.

۸-۳- تکیه‌گاه با سه دسته درزه

تکیه‌گاه و پی حاوی سه دسته درزه بوده، امتداد دسته درزه اول همانند حالت اول دارای امتدادی به موازات محور سد

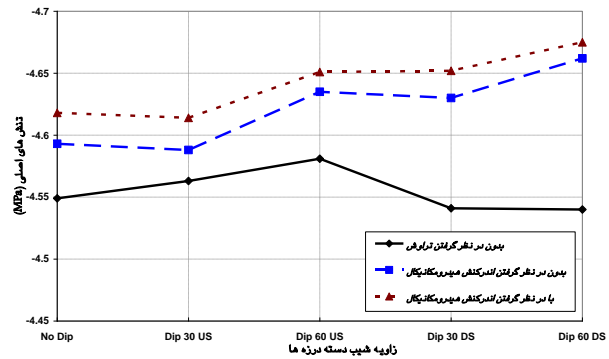


شکل (۱۵) مقایسه حداکثر تنش‌های اصلی در تکیه‌گاه



شکل (۱۶) مقایسه بیشینه تنشهای برشی در تکیه‌گاه

بوده و دارای زاویه شیب متغیر می‌باشد. دسته درزه دوم دارای امتدادی عمود بر محور سد و دارای زاویه شیب ۹۰ درجه نسبت به افق می‌باشد. دسته درزه سوم دارای امتدادی به موازات محور سد و با زاویه شیب ۹۰ درجه می‌باشد. مشخصات همه دسته درزه‌ها برابر جدول ۱ می‌باشد.



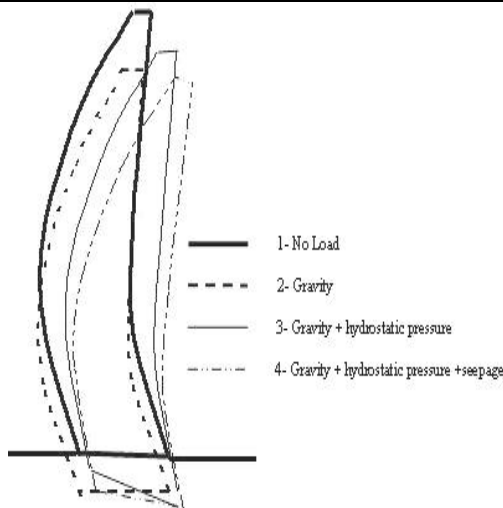
شکل (۱۷) مقایسه حداکثر تنش‌های اصلی در بدنه سد

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ هم مشاهده می‌شود که در صورتی

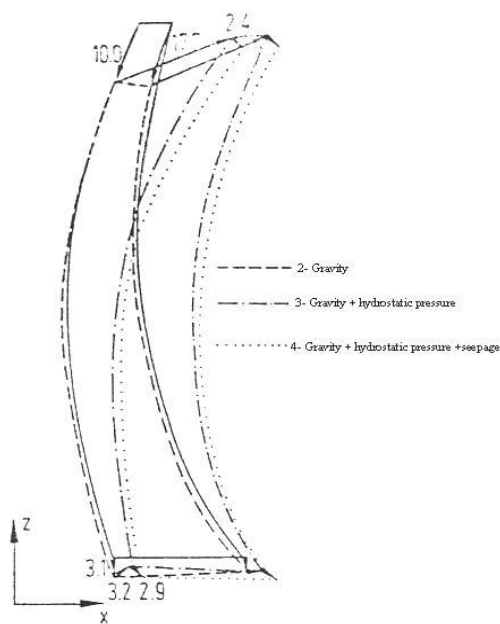
جدول ۲ مقایسه جابجایی حاصل از تحلیل‌های انجام شده توسط

ویتکه و طرح حاضر

نوع بارگذاری	کارهای ویتکه	نتایج طرح حاضر
وزن + فشار هیدرواستاتیک	۱۷.۷mm	۴۸.۶mm
وزن + فشار هیدرواستاتیک + تراوش	۲۴mm	۷۵.۶mm
درصد افزایش جابجایی	٪۳۶	٪۵۵



الف

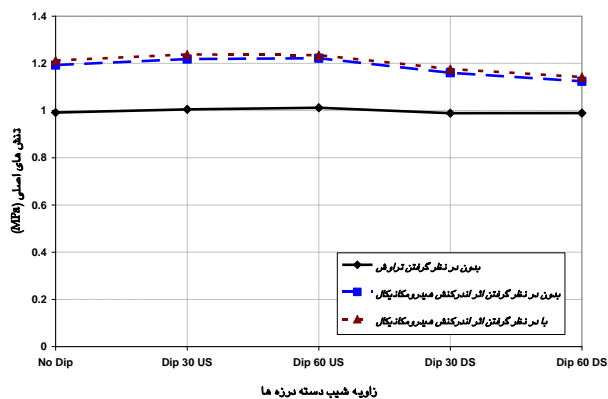


ب

شکل (۲۱) الگوی تغییر مکان طره مرکزی تحت بارگذاری‌های مختلف الف- بدست آمده از FEAP-HM ب- از کارهای ویتکه [۷]

۹- نتایج

در تحقیق حاضر به بررسی اثرات تراوش بر روی پایداری



شکل (۲۰) مقایسه بیشینه تنشهای برشی در تکیه‌گاه

۸-۴- مقایسه تغییر شکلها

از نکات قابل طرح، مقایسه نتایج حاصل از تغییر شکلها می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل توسط برنامه FEAP-HM برای سه دسته درزه عمود برهم (حالت سوم، دسته درزه اصلی با شیب صفر درجه) با مشخصات جدول (۱) در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر مکان حاصل از بارگذاری‌های مختلف در شکل ۲۱ نشان داده شده است. تغییر مکان حداکثر حاصل از بار وزن برابر ۲.۲۷ سانتیمتر، تغییر مکان حاصل از بارگذاری وزن و فشار هیدرواستاتیک بر بدنه برابر ۴.۸۶ سانتیمتر و تغییر مکان حاصل از بارگذاری وزن، فشار هیدرواستاتیک و نیروهای تراوش برابر ۷.۵۶ سانتیمتر بوده که اثر قابل توجه تراوش بر تغییر مکانها را نیز نشان می‌دهد. برای مقایسه می‌توان نتایج کار ویتکه [۷] را با تحقیق حاضر نشان داد.

ویتکه سدی با ارتفاع ۱۲۰ متر و طول تاج ۳۰۰ متر را که بر روی پی سنگی حاوی سه دسته درزه قرار گرفته است، مدل کرده و تحلیل‌هایی بر روی این سد با استفاده از نرم‌افزارهای HYD03 و FEST03 انجام داده است. در جدول ۲ نتایج حاصل از کارهای وی و تحقیق حاضر برای سنجش درستی مقایسه شده است. البته به جهت نبود اطلاعات هندسه سد و تکیه‌گاه در کار ویتکه در اینجا فقط به مقایسه نوع و درصد اثر اندرکنش هیدرومکانیکال و نیز الگوی تغییر مکان بسنده شده است. تفاوت حاصله در نتایج ناشی از تفاوت در هندسه سد و تکیه‌گاه، مشخصات مکانیکی مصالح (به ویژه انعطاف پذیری زیاد پی در تحقیق حاضر) و نحوه قرارگیری درزه‌ها در دو مدل می‌باشد. همچنین می‌توان به تفاوت نحوه مدلسازی رفتار مکانیکی (استفاده از مدل برتر چندلایه در این بررسی) به عنوان یکی دیگر از منشاهای اختلاف کوچک موجود نیز اشاره کرد.



سد قوسی طی این مطالعه این مطالعه چندان قابل توجه نبوده است لیکن در تمام حالات اشاره شده عدم مطالعه و بررسی تراوش و یا اندرکنش یاد شده باعث تخمین ناصحیح و خلاف جهت اطمینان تنشها بویژه در تکیه‌گاه جانبی سد می‌شود.

سدهای بتنی قوسی پرداخته شده است. تمرکز این تحقیق با توجه به دامنه وسیع اثرات تراوش بر روی پایداری، متمرکز بر اندرکنش هیدرومکانیکال در توده‌سنگ درزه‌دار واقع در پی و تکیه‌گاه سدهای بتنی شده است. در ادامه نتایج حاصل از بررسی محدود صورت گرفته از این تحقیق بیان می‌شود:

۱۰- مراجع

خندان بکاولی، محمد، اثر تراوش بر پایداری توده سنگ درزه دار در پی سدهای قوسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.

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

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

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

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

Serafim, J.L.; Safety of Dams, Balkema, 1984.

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

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

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.

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.

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.

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

Zienkiewicz, O.C., Pande. G.N., "Time Dependant Multilaminar 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.

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

۱- اگر توده سنگ پی و تکیه‌گاه در سدهای بتنی قوسی حاوی یک دسته درزه اصلی موازی محور سد باشند و پی سد بدون در نظر گرفتن اثرات تراوش در تکیه‌گاه مدل شود، مقدار اختلاف تنشهای بدست آمده در بدنه نسبت به حالتی که تراوش در تکیه‌گاه مدل می‌شود می‌تواند ناچیز باشد. این قضیه در مورد میانگین تفاضل تنشهای اصلی نیز صادق خواهد بود.

۲- اگر پی و تکیه‌گاه حاوی یک دسته درزه اصلی موازی محور سد باشد، زمانیکه اثر تراوش در تکیه‌گاه مدل نشود، مقدار تنشهای حاصله در تکیه‌گاه نسبت به حالتیکه تراوش در تکیه‌گاه مدل می‌شود، می‌تواند بسیار ناچیز باشد. این اختلاف در مورد میانگین تفاضل تنشهای اصلی بسیار فاحش بوده و در دسته درزه‌های با شیب ۳۰ تا ۶۰ درجه به سمت بالادست می‌تواند به حدود ۴۰٪ بالغ گردد.

۳- اگر پی و تکیه‌گاه حاوی دو یا سه دسته درزه باشد (بدون شیب جانبی) در حالتیکه اثر تراوش در تکیه‌گاه مدل نشود مقدار تنشهای حاصله در بدنه سد نسبت به حالتی که تراوش در تکیه‌گاه مدل شود، می‌تواند کمتر گردد. این اختلاف در صورت وجود درزه اصلی با شیب ۶۰ درجه به طرف پایین دست قابل توجه‌تر گشته است.

۴- اگر پی و تکیه‌گاه حاوی دو یا سه دسته درزه (بدون شیب جانبی) باشد در حالتیکه اثر تراوش در تکیه‌گاه مدل نشود مقدار تنشهای حاصله در تکیه‌گاه سد نسبت به حالتی که تراوش در تکیه‌گاه مدل شود، می‌تواند بسیار کمتر و انمود گردد. بنابراین رعایت آن و نیز بررسی و مطالعه اندرکنش هیدرومکانیکال دید واقع‌بینانه‌تری نسبت به تنشها می‌دهد.

۵- گرچه اهمیت اندرکنش هیدرومکانیکال در صرف بدنه

