

PHN10110881250

تحلیل ظرفیت باربری پی‌سنگها تحت اثر بارهای وزنی با در
نظر گرفتن اثر آب

مهرانگیز غفاری¹، محمدحسین بازاریار²، احمد فهیمی‌فر³

1- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه یاسوج

2- استادیار، دانشگاه یاسوج

3- استاد، دانشگاه امیرکبیر

mehrangiz.ghaffari@yahoo.com

خلاصه

در این پژوهش سعی بر این است که اثر رطوبت در ظرفیت باربری پی‌سنگ بررسی شود. بدین منظور، پی سنگ سد هایقر فارس به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شده و با استفاده از روش‌های تحلیلی موجود و پارامترهای مقاومتی سنگ در شرایط رطوبتی خشک و اشباع، ظرفیت باربری مجاز پی‌سنگ سد محاسبه می‌شود. سپس با مدلسازی عددی سد در محیط دو بعدی، توسط نرم افزار ABAQUS، آنالیز تنش انجام شده و با کمک معیار گسیختگی هوک و براون ظرفیت باربری مجاز پی سنگ محاسبه می‌شود. در انتها با مقایسه مقادیر ظرفیت باربری مجاز بدست آمده از روش‌های تحلیلی و عددی، این نتیجه حاصل شده است که ظرفیت باربری مجاز سنگ در این مورد خاص، در شرایطی که توده سنگ کاملاً اشباع باشد، نسبت به شرایط کاملاً خشک، کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از اثر رطوبت در تعیین ظرفیت باربری مجاز پی سنگ نمی‌توان صرف‌نظر کرد.

کلمات کلیدی: پی سنگی، ظرفیت باربری، مدل عددی، روش‌های تحلیلی.

1. مقدمه

بسترهای سنگی که به عنوان بستر باربری در زیر پی‌ها خصوصاً بارهای بزرگ از جمله سدها قرار می‌گیرند علی‌رغم اینکه انتظار می‌رود از ظرفیت باربری بالا خصوصاً در مقایسه با خاکها برخوردار باشند، بعلاوه ساختار غالباً ناپیوسته و پیچیده توده‌های سنگی اغلب مشکلات عدیده‌ای در عمل، در این ارتباط مشاهده می‌شود و تعیین ظرفیت باربری پی‌سنگها را با استفاده از روش‌های رایج، زیر سؤال می‌برد و ارائه روش‌های دقیق‌تر و متناسب با شرایط حاکم بر توده را ضروری می‌سازد. بویژه در رابطه با سدها که توده سنگ اساساً در حضور آب باید رفتاری سنجیده و مطمئن در طی عمر خود نشان دهد. برهمکنش سنگ و آب در بسیاری از موارد به کاهش خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ منجر می‌شود. تعیین این اثر برای اهداف طراحی در پروژه‌های مهندسی سنگ به صورت یک مشکل جدی پدیدار شده است [1]. از طرفی با توجه به اثر مخرب آب بر خصوصیات مقاومتی سنگ، وارد کردن میزان رطوبت سنگ در روابط تحلیل ظرفیت باربری اهمیت خاصی دارد. اثر مضر آب بر انواع مختلف سنگ به وسیله‌ی محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است [2]، [3]، [4]، [5]، [6]، [7]، [8]، [9]. اما علی‌رغم فعالیت‌های گسترده‌ی انجام شده، تاکنون هیچ رابطه کلی که بیان‌کننده اثر رطوبت در محاسبه ظرفیت باربری سنگ باشد ارائه نشده است [10].

در این پژوهش با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی به کمک نرم افزار اجزاء محدود (ABAQUS) ظرفیت باربری پی سنگ مربوط به سد هایقر فارس، در شرایط رطوبتی خشک و اشباع مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با مقایسه نتایج حاصله تأثیر رطوبت در تعیین ظرفیت باربری پی سنگ سد هایقر فارس آشکار می‌گردد.

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 30 مهر و 1 آبان ماه ۱۳۹۲

2. مشخصات هندسی و مقاومتی پی‌سنگ سد هایقر

نمونه مطالعاتی انتخاب شده برای ارزیابی ظرفیت باربری، پی‌سنگ سد هایقر فارس می‌باشد که این سد در دست احداث است. سد هایقر فارس سدی مخزنی از جنس بتن و به درازای 200 متر و با ارتفاع 79 متر از کف رودخانه، در فاصله حدود 45 کیلومتری جنوب شرقی شهرستان فیروزآباد در محلی بنام تنگ عربها یا تنگ هایقر واقع شده است. دیواره تنگ هایقر در لایه‌های سنگاکی سازند آسماری (OMA) شکل گرفته است. بنابراین می‌توان جنس سنگ ساختگاه را سنگاکی در نظر گرفت که شاخص کیفی سنگ (RQD) در دامنه دست راست دره و پی برابر با 85 و در دامنه دست چپ برابر با 60 می‌باشد. در جدول (1) پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی توده سنگ جایگاه سد هایقر فارس ارائه شده است [11]، [12].

جدول 1- پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی توده‌سنگ ساختگاه سد [11]، [12]

شرایط رطوبتی اشباع	شرایط رطوبتی خشک	پارامتر
2580	2540	$\gamma \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
48	60	$\sigma_c \text{ (MPa)}$
32/87	45/42	$E_i \text{ (GPa)}$
0/2	0/2	ν
24/08	28/74	ϕ^0
1/837	3/032	$c \text{ (MPa)}$
5/5	14	$E_m \text{ (MPa)}$

3. تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش‌های تحلیلی

برای محاسبه ظرفیت باربری سنگ، روش‌های مختلفی ارائه شده است که از بین این روش‌ها، 6 روش انتخاب شد. روش‌های به کار برده شده بر اساس روابط تجربی از جمله رابطه ترزاقی، مطالعات آزمایشگاهی، معیار گسیختگی هوک و براون و روش حد بالا ارائه شده‌اند. با بکارگیری پارامترهای ژئومکانیکی ارائه شده در جدول (1) و استفاده از این روش‌ها، ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی سنگ سد هایقر فارس در شرایط رطوبتی خشک و اشباع به صورت جداول (2) و (3) محاسبه شد.

جدول 2- مقادیر ظرفیت باربری نهایی (MPa) بدست آمده از روش‌های مختلف

حالت اشباع	حالت خشک	روش
------------	----------	-----

اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
 دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 30 مهر و 1 آبان ماه ۱۳۹۲

76	95	انجمن ژئوتکنیک
51/14	105/33	روش باولز [14]
67	87/52	روش رامامورتی
41/55	85/97	روش سرانو و اولالا [16]، [17]
42/35	96/56	روش حد بالا [18]

جدول 3- مقادیر ظرفیت باربری مجاز (MPa) بدست آمده

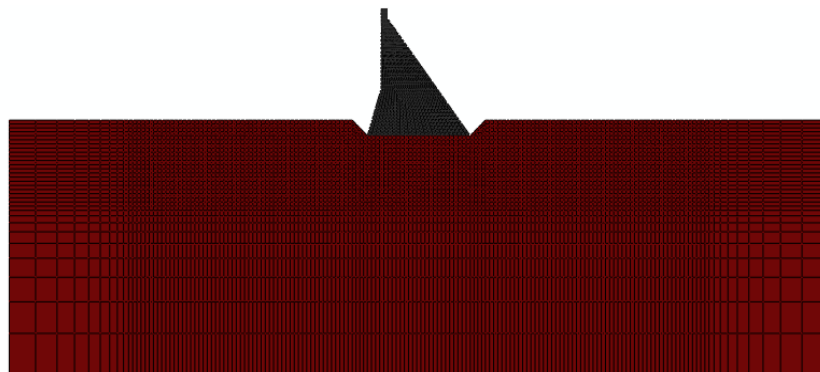
حالت اشباع	حالت خشک	روش
1/4	2/4	Rochester, New York
1/77	2/82	روش سرانو و اولالا

4. مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود سد و ساختگاه

برای مدلسازی سد، از مدلسازی در محیط دو بعدی استفاده شده است. مدل دو بعدی ساخته شده متشکل از 875 المان بدنه سد و 4821 المان برای مدلسازی توده سنگ در زیر سد می باشد که در شکل 1 قابل مشاهده است. نوع المان های استفاده شده در مدل دو بعدی سد $CPE8RP^1$ ، که نوعی المان چهارضلعی با هشت گره است، می باشد. ابعاد مدل ساخته شده در محیط دو بعدی، 250 متر در اطراف بدنه سد و 180 متر در زیر سد می باشد. در این تحقیق اثر رطوبت به صورت کاهش پارامترهای مقاومتی توده سنگ در مدل وارد شده است. به منظور بررسی اثر آب بر ظرفیت باربری پی سنگ سد هایقر فارس، آنالیز تنش در دو حالت انجام شده است:

حالت اول با مدلسازی سد و ساختگاه سنگی در شرایط رطوبتی خشک و حالت دوم با مدلسازی در شرایط رطوبتی اشباع.

تنش های فشاری با علامت منفی و تنش های کششی با علامت مثبت نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که کلیه تنش ها بر اساس Pa می باشند. در اشکال 2 و 3 کانتور تنش های قائم ایجاد شده در سد و بستر سنگی در دو حالت خشک و اشباع نشان داده شده است.



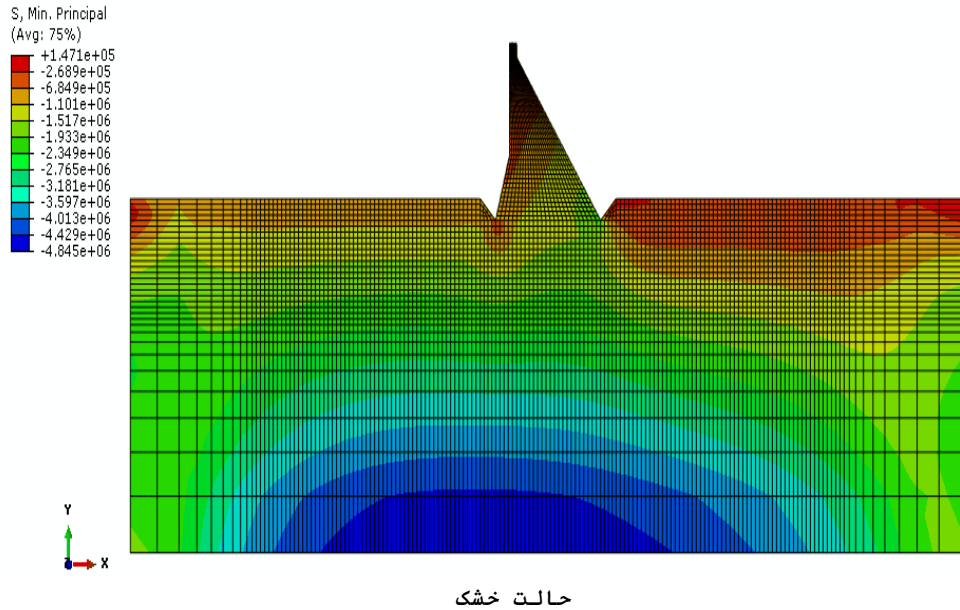
مدل دو
سد هایقر

شکل 1-
بعدي
فارس
در

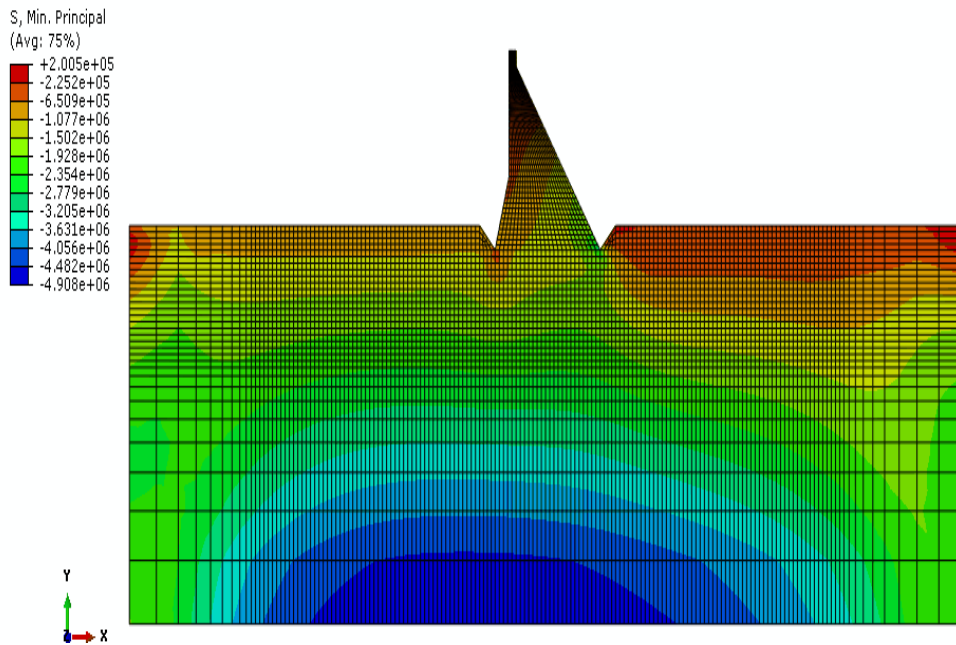
اشکال 2

و 3 حداقل تنش های ایجاد شده (حداکثر تنش های فشاری) در دو حالت خشک و اشباع را میتوان مشاهده کرد.

¹ An 8-node Plane Strain quadrilateral, biquadratic displacement, bilinear pore pressure, reduced integration



شکل 2-
کانتور تنش حداقل در



شکل 3-
-3

با مقایسه حداکثر تنش‌های فشاری ایجاد شده در دو حالت خشک و اشباع (اشکال 2 و 3) می‌بینیم که تنش‌های فشاری ایجاد شده در حالت اشباع، $4/908 \times 10^6 \text{ Pa}$ ، نسبت به تنش‌های فشاری متناظر در حالت خشک، $4/845 \times 10^6 \text{ Pa}$ ، افزایش یافته‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان رطوبت پی سنگ، مقدار تنش‌های فشاری ایجاد شده در آن در اثر بارهای وزنی افزایش می‌یابد که بایستی این اثر در محاسبه ظرفیت باربری توده سنگ لحاظ شود.

5. محاسبه ضرائب اطمینان و ظرفیت باربری مجاز

هرگونه بحث و بررسی پیرامون رفتار و پایداری یک سازه چنانچه در غالب ارائه ضرایب اطمینان صورت پذیرد، از مقبولیت و اعتبار خاصی برخوردار خواهد بود [13].

برای تعیین ظرفیت باربری مجاز پی سد هایقر فارس، ضرایب اطمینان در نقاط بحرانی محاسبه شده و با تقسیم ظرفیت باربری نهایی بر ضرایب اطمینان، ظرفیت باربری مجاز محاسبه می‌شود.
 ضریب اطمینان در حالت کلی از رابطه 1 قابل محاسبه می‌باشد.

$$F.S = \frac{\text{ترم مقاومتی}}{\text{ترم مخرب}} \quad (1)$$

ضرایب اطمینان در حالت کلی به دو دسته ضرایب اطمینان مصالح در فشار و ضرایب اطمینان مصالح در کشش تقسیم می‌شوند [19]. در این تحقیق ضریب اطمینان فشاری توده سنگ با توجه به معیار خرابی هوک و براون مورد بررسی قرار گرفته است. می‌دانیم ارتباط تنش‌ها در نقطه شکست سنگ مطابق با معیار هوک و براون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (3)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (5)$$

عامل بروز خرابی در معیار هوک و براون، اختلاف بین تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل $(\sigma_1 - \sigma_3)$ و عامل مقاومتی با توجه به رابطه 2، مقدار $\sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$ می‌باشد. لذا ضریب اطمینان فشاری با توجه به رابطه 1 برابر خواهد شد با:

$$F.S_C = \frac{\sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (6)$$

در عبارت فوق چنانچه مقدار داخل پرانتز منفی گردد، ضریب اطمینان فشاری از این فرمول قابل محاسبه نخواهد بود. از طرفی با توجه به اینکه مقدار داخل پرانتز در صورتی صفر خواهد شد که $\sigma_3 = \frac{-s\sigma_{ci}}{m_b}$ شود و با توجه به کوچک بودن مقدار s در مقایسه با مقدار m_b ، بنابراین مقدار تنش حداقل σ_3 بسیار به صفر نزدیک خواهد شد و لذا در بدترین شرایط از نظر فشار، شرایط فشار تکمحوری بر المان مورد نظر حاکم خواهد بود و باید ضریب اطمینان فشاری را برای حالت فشاری تکمحوری و از رابطه 7 محاسبه کرد.

$$F.S_C = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_1} \quad (7)$$

که در آن σ_{cm} ، مقاومت فشاری توده سنگ است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a \quad (8)$$

واضح است که چنانچه مقدار تنش اصلی حداکثر منفی گردد $(\sigma_1 < 0)$ ، المان از نظر فشاری ایمن خواهد بود.
 بنابراین می‌توانیم روند تعیین ضرایب اطمینان فشاری را به صورت رابطه 9 خلاصه کنیم.

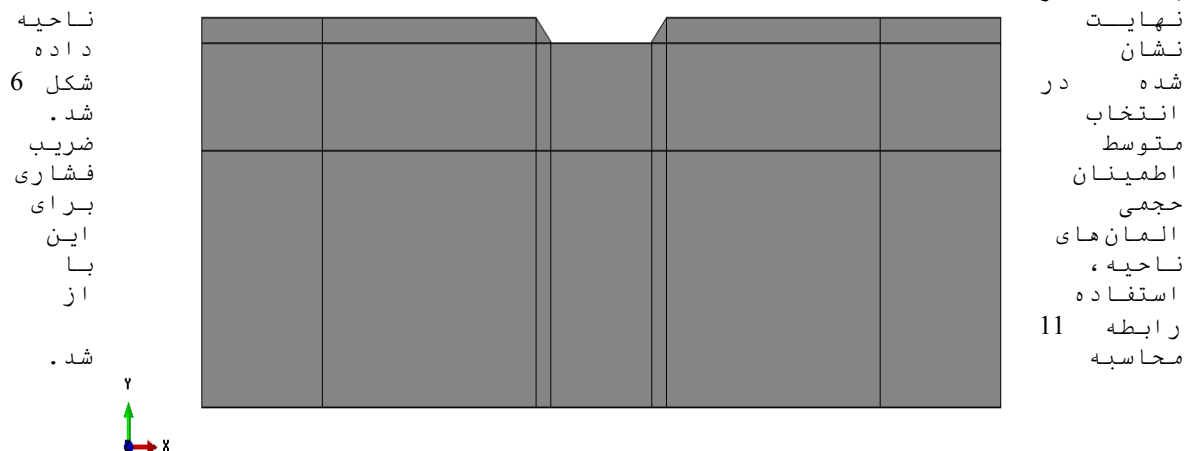
$$\text{if} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right) > 0 \Rightarrow F.S.C = \frac{\sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (9)$$

$$\text{if} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right) < 0 \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \sigma_1 > 0 \rightarrow F.S.C = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_1} \\ \sigma_1 < 0 \rightarrow \text{المان از نظر فشاری ایمن است.} \end{array} \right\} \quad (10)$$

از آنجا که ضرائب اطمینان برای المان‌های مدل محاسبه می‌شوند و هدف یافتن ضریب اطمینان کلی برای مدل ایجاد شده است، لازم است که مقدار متوسطی برای ضریب اطمینان (در این تحقیق فشاری) تعیین کنیم. بدین منظور از پارامتر ضریب اطمینان حجمی، که با استفاده از رابطه 11 بدست می‌آید استفاده می‌کنیم. (11)

$$F.S.C.Sector = \frac{\sum F.S.C.e \times V_e}{\sum V_e}$$

در رابطه فوق $F.S.C.e$ ضریب اطمینان فشاری محاسبه شده برای هر المان و V_e حجم هر المان می‌باشد. لازم به توضیح است که مخرج کسر فوق در واقع مجموع حجم المان‌های بررسی شده در هر ناحیه را نشان می‌دهد. جهت محاسبه ضریب اطمینان در مدل 2D، المان‌های مربوط به یک ناحیه در زیر سد بگونه‌ای در نظر گرفته شد که تا حد امکان زیر سد را پوشش داده و به میزان کافی از مرزهای مدل فاصله داشته باشد. در نهایت نشان شده در انتخاب متوسط اطمینان حجمی المان‌های ناحیه، استفاده رابطه 11 محاسبه



شکل 6. نواحی انتخابی برای یافتن ضریب اطمینان

در جدول 4 نتایج متوسط ضریب اطمینان فشاری حجمی در دو حالت خشک و اشباع، نشان داده شده است.

جدول 4- ضریب اطمینان فشاری

شرایط موجود	ضریب اطمینان فشاری
حالت خشک	4/47
حالت اشباع	2/68

برای تعیین ظرفیت باربری مجاز پی سد، باید مقدار ظرفیت باربری نهایی توده سنگ را بر مقادیر ضرایب اطمینان بدست آمده تقسیم کنیم. طبق پیشنهاد هوک و براون [20]، مقاومت کلی توده سنگ از رابطه 12 تعیین می-شود.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن این مقدار به عنوان ظرفیت باربری نهایی توده سنگ و با در اختیار داشتن ضرایب اطمینان، ظرفیت باربری مجاز پی سد هایقر فارس مطابق جدول 5 بدست می آید.

جدول 5- ظرفیت باربری مجاز پی سد هایقر فارس

ظرفیت باربری مجاز (MPa)	ضریب اطمینان فشاری	مقاومت فشاری توده سنگ (MPa)	شرایط رطوبتی
2/29	4/47	10/244	حالت خشک
2/11	2/68	5/664	حالت اشباع

5. نتیجه و جمع بندی

علی رغم پژوهش های انجام شده در زمینه اثر آب بر ظرفیت باربری سنگ، تاکنون هیچ رابطه تحلیلی کلی برای وارد کردن این اثر در ظرفیت باربری سنگ ارائه نشده است.

نتایج زیر از آنالیز تنش انجام شده در پی سنگی بدست آمده است:

- نتایج حاصل از آنالیز تنش برای دو حالت خشک و اشباع نشان می دهد که بین تنش های ماکزیمم و مینیمم بدست آمده از دو روش فوق، اختلاف وجود دارد. همچنین، در المان های موجود تنش ها و تغییر مکان های متفاوتی حاصل می شود.
- تغییر مکان در حالت اشباع نسبت به حالت خشک افزایش یافته است و ضریب اطمینان در شرایط اشباع از ضریب اطمینان حاصل شده در شرایط خشک کمتر است. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که رطوبت، موجب کاهش مقاومت توده سنگ می شود و ظرفیت باربری آن را کاهش می دهد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که از اثر رطوبت در تعیین ظرفیت باربری مجاز پی سنگ نمی توان صرف نظر کرد.

12. مراجع

1. A. Fahimifar, H. Soroush, "A Moisture Index Classification System for Rocks (MIC System)" Rock Mech Rock Eng, 63-79, 2007. Atluri, S.N. and Shen, S. (2002), "The Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method", Tech Science Press, USA.
2. Ballivy, G., Ladanyi, B., Gill, DE., (1976). "Effect of water saturation history on the strength of low-porosity rocks, soil specimen preparation for laboratory testing. " ASTM, 599: 4-20.

3. Broch, E., "Changes in rock strength by water", Proc 4th cong int soc rock mech, montreux, Vol. 1, 71-5, 1979.
4. Colback, PSB., Wild, BL., "The influence of moisture content on the compressive strength of rock", Proc 3rd canad rock mech symp, 65-83, 1965.
5. AK. Dube, B. Singh, "Effect of humidity on tensile strength of sandstone" J mines Met Fuels, 8-10, 1972.
6. K. Masuda, "Effect of water on rock strength in a brittle regime" J Struct Geol, 1653-7, 2001.
7. Parate, NS., "influence of water on the strength of limestone" Trans Soc Min Eng AIME, 127-31, 1973.
8. Vasarhelyi, B., "Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions" Bull Eng Geol Environ, 245-9, 2003.
9. I. Yilmaz, "Influence of water content on the strength and deformability of gypsum" Int J Rock Mech Min Sci, 342-47, 2010.
10. Imani, M., Fahimifar, A., Sharifzadeh, M., "Upper Bound Solution for the Bearing Capacity of Submerged Jointed Rock Foundations" Rock Mech Rock Eng, 639-46, 2012.
11. گزارش جلد چهارم (قسمت الف): "گزارش مطالعات ژئوتکنیکی جایگاه های سد مخزنی هایقر و سد تنظیمی- انحرافی دهرود + مسیر تونل انتقال"، مطالعات مرحله دوم: "طرح سد مخزنی هایقر (دهرود) و خط انتقال آب شرب و صنعت به منطقه جنوب و شبکه آبیاری اراضی دهرود و احمدآباد و آزادگان"، مهندسين مشاور آب نیرو، مهرماه 1385.
12. گزارش جلد سوم: "نتایج مطالعات زمین‌شناسی مهندسی محل سد مخزنی هایقر، سد تنظیمی دهرود، تونل انتقال و مسیر خط لوله‌ی انتقال آب به جنوب"، مطالعات مرحله دوم: "طرح سد مخزنی هایقر (دهرود) و خط انتقال آب شرب و صنعت به منطقه جنوب و شبکه آبیاری اراضی دهرود و احمدآباد و آزادگان"، مهندسين مشاور آب نیرو، اردیبهشت ماه 1386.
13. ایمانی، میثم، «ارزیابی ظرفیت باربری پی‌های سنگی درزدار تحت اثر بار سدهای بتنی وزنی، مطالعه موردی سد رودبار لرستان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، 1385.
14. Bowles, J.E; *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill Inc, New York, 1996.
15. Ramamurthy, T., "Bearing capacity of rock foundations", *Conf. Rock foundation.*, Balkema, Rotterdam, 311-316, 1995.
16. A. Serrano, C. Olalla, "Ultimate bearing capacity of rock masses", *Int.J.Rock. Mech. Min. Sci*, 31(2), 93-106, 1994.
17. A. Serrano, C. Olalla, "Allowable bearing capacity of rock foundations using a non-linear failure criterium", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci*, 33(4), 327-345, 1996.
18. X. L. Yang, J. H. Yin, "Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion", *Int. J. Rock. Mech. Min.Sci*, 42, 550-560, 2005.
19. دلفروزی، محمود، «بررسی اندرکنش هیدرومکانیکی سازه سد قوسی- پی با درنظر گرفتن پدیده تراوش و آبشکست در پی سدهای قوسی، مطالعه موردی سد قوسی کارون سه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، 1382.
20. Hoek, E., Carranza-Torres, E., and Corkum, B. "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition", *NARMS*, Toronto, 2002.