



کنفرانس بین المللی سبکسازی و زلزله  
جهاد دانشگاهی آسان کرمان  
1389 دیهشت 12 تا 1

## بررسی کارایی سازه فضاکار به عنوان پشت بند سد

محسن محمدی<sup>1</sup>، هومن رنجبر<sup>2</sup>، غلام عباس بارانی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

mohsen.m62@gmail.com

2- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ranjbarhooman@gmail.com

3- استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

gab@mail.uk.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق توپولوژی سازه فضاکاری به عنوان جانشین برای پشت بند بتنی شماره 12 سد لتیان توسط نرم افزار Formian ساخته شده است. آنالیز و طراحی این توپولوژی توسط نرم افزار SAP2000 صورت گرفته است. در این برنامه بارگذاری بر اساس آیین نامه USBR می باشد که شامل بارهای مرده، فشار آب، فشار رسوب و فشار هیدرودینامیکی است. پس از آنالیز و طراحی سازه مشاهده شد که بیشینه جابجایی گره ها در روش طراحی تنش مجاز 7 سانتی متر و در روش مقاومت نهایی 12 سانتی متر است که بسیار کم می باشد. همچنین وزن پشت بند سازه فضاکاری در روش مقاومت نهایی 20 درصد سبک تر از روش طراحی تنش مجاز می باشد که هر دو آنها بسیار سبک تر از پشت بند بتنی است که می تواند دلیلی برای عملکرد پشت بند سازه فضاکاری در مقابل نیروهای زلزله باشد.

**واژه های کلیدی:** سد پشت بنددار، سازه های فضاکار، سد لتیان، پشت بند.

### 1. مقدمه

در طول تاریخ سازه های بزرگ عمرانی در جای جای دنیا ساخته شده است که از بین آنها سازه هایی همچون سدها بدلیل نیاز بشر به تامین آب آشامیدنی، کشاورزی و امروزه برای تامین نیروی برق مورد توجه قرار داشته است. سدها شامل انواع مختلفی می باشند که معیارهای تقسیم بندی آنها می تواند شامل مواردی چون نوع استفاده و بهره برداری، طراحی هیدرولیکی، مصالح بدنه، سختی و رفتار سازه ای باشد. سدها بر اساس نوع مصالح بدنه به انواع سدهای خاکی، سدهای سنگی، سدهای بتنی، سدها با مصالح بنایی، سدهای چوبی و فولادی و سدهای لاستیکی تقسیم بندی می شوند. سدهای

بتنی بر اساس نوع طراحی و رفتار سازه ای خود به سدهای بتنی وزنی، سدهای پشت‌بنددار، سدهای قوسی، سدهای بتنی غلتکی دسته بندی می‌شوند [1].

اگر بال‌های پایین دست سد وزنی را حذف کنند، سد پشت‌بنددار تشکیل می‌گردد. این سدها که زیر مجموعه سدهای بتنی می‌باشند، متشکلند از یک پوسته شیب دار<sup>1</sup> که به تعدادی دیوار پشت بند<sup>2</sup> که عمود بر محور سد قرار گرفته اند تکیه می‌کنند. هنگامی که مخزن سد پُر است، فشار آب وارد بر روی صفحه بالادست به دیواره‌های پشت بند و از آنجا به شالوده منتقل می‌شود. از مزایای این نوع سد نسبت به انواع دیگر سدهای وزنی می‌توان به حجم بتن ریزی کمتر، ناچیز بودن نیروهای بالابرنده و فشار یخ، نیاز به فونداسیون ضعیف تر و بازرسی مناسب تر اشاره نمود. این نوع سدها دارای معایبی چون قالب بندی پیچیده و هزینه ساخت بالا، احتیاج به مهارت کاری بیشتر، عدم اجرا در هوای خیلی سرد به علت خرد شدن سطحی بتن و اجرای طولانی تر نسبت به سدهای وزنی هستند.

اگرچه اجزای سازه ای اصلی سدهای پشتبند دار در 2 جزء دال شیب دار در بالا دست و پایه ها یا دیوارهای قائم که نگهدارنده دال مذکور هستند، خلاصه می‌شود اما در حالت کلی اجزای مختلف این نوع سدها از دال یا پوسته شیب دار، پایه ها، پی<sup>3</sup>، قیدها یا بست های جانبی و افقی<sup>4</sup>، زیر سدی یا ماهیچه<sup>5</sup> و پرده آب بند<sup>6</sup> تشکیل شده است [2]. انواع سدهای پشت بند دار عبارت است از سد پشتبند دار با دال مسطح، سد پشتبند دار نوع کله گرد و کله الماسی، سد پشتبند دار چند قوسی، سد پشتبند دار چند گنبدی، سد پشتبند دار ستونی، سد پشتبند دار خر پایی و سد پشتبند دار ترکیبی می‌باشند. در میان سدهای پشت‌بنددار شناخته شده، اولین سد در اسپانیا در قرن 16 میلادی و با نام Elche ساخته شد که دارای 23 متر ارتفاع بوده و از مصالح سنگین با دهانه های قوسی (در حد فاصل پایه ها) تشکیل شده است.

سد های پشت‌بنددار نوع کله گرد و کله الماسی در حالت کلی "سدهای پشتبند دار کله سنگین" نامیده می‌شوند. در این نوع سدهای قسمت بالادست پایه ها به صورت کله گرد یا الماسی شکل و بسیار بزرگ و سنگین ساخته می‌شود به گونه ای که کله های پایه های متوالی به یکدیگر مماس گشته، خود تشکیل عضو نگهدارنده آب می‌دهند و لذا نیازی به یک پوسته جداگانه در بالادست نمی‌باشد. سدهای مذکور گاهی از اوقات در مناطقی که دارای سنگ کف نسبتاً ضعیف هستند به کار گرفته می‌شوند. اولین سدی که به این صورت ساخته شد، Martin در مکزیک است که در سال 1925 ساخته شد. همچنین سد منجیل با ارتفاع 101 متر و طول تاج 425 متر که در سال 1342 و سد لتیان با ارتفاع 87 متر که در سال 1346 به مرحله بهره‌برداری رسیده اند، از جمله سدهای مشهور ساخته شده از این نوع در ایران هستند.

یکی از مهم ترین سدهای پشت بند دار در کشور سد لتیان است که در شکل (1) مشاهده می‌شود. مطالعات به منظور احداث این سد در سال 1338 آغاز و در سال 1342 عملیات احداث آن شروع گردید و در سال 1346 به بهره برداری رسید. این سد بر روی رودخانه جاجرود با سطح حوزه آبریزی به مساحت 69800 کیلومترمربع و با متوسط جریان آب سالانه به میزان 350 میلیون مترمکعب در استان تهران و در فاصله 35 کیلومتری شمال شرقی تهران و 5 کیلومتری بخش جاجرود قرار دارد. شکل 1 این سد را نشان می‌دهد که طول تاج آن 450 متر، عرض تاج 9 متر، ارتفاع از کف رودخانه 80 متر و از پی 107 متر می‌باشد [3]. این سد دارای 21 عدد پشت بند بتنی از نوع پیشانی حجیم می‌باشد که پیشانی آن

<sup>1</sup> Sloping membrane-Deck

<sup>2</sup> buttress

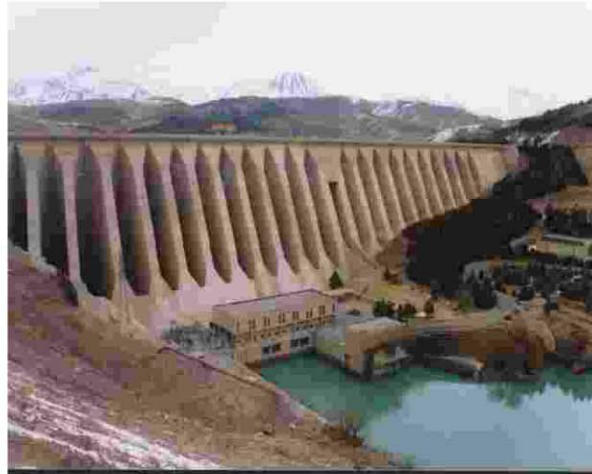
<sup>3</sup> Footings

<sup>4</sup> Lateral Braces

<sup>5</sup> Corbel

<sup>6</sup> Cutoff

از نوع کله الماسی است. فاصله بین پشت بندها با ارتفاع کمتر از 84 متر، 15 متر و برای ارتفاع بیشتر از 84 متر، 20 متر می باشد. از اهداف احداث سد لتیان می توان به تامین آب شرب تهران به میزان 290 میلیون مترمکعب، تامین آب زراعی دشت ورامین به میزان متوسط 160 میلیون مترمکعب و همچنین تولید انرژی برق-آب اشاره نمود.



شکل 1- نمایی از سد لتیان

#### 1-1. سازه های فضاکار

سازه های فضاکار، سازه هایی هستند که از اعضای اسکلتی مستقیم تشکیل شده اند که رفتار مناسبی در برابر نیروی زلزله از خود نشان می دهند و به علت وزن کم و اجرای سریع به دلیل استفاده از اعضای تیپ پیش ساخته، مورد توجه قرار گرفته اند. اعضای این سازه ها از مقاطعی هستند که شعاع ژیراسیون آن ها در تمام جهات یکسان است و یا حداقل نسبت به محورها تفاوتی با هم ندارند. لذا مقاطع مورد استفاده در این سازه ها معمولاً لوله و قوطی می باشد. اتصالات اعضا در سدهای فضاکار ممکن است اتصال مفصلی، صلب و یا ترکیبی از این دو باشد. در سیستمی که اتصالات آن مفصلی است نیروی اعضا عمدتاً محوری بوده و خمش بسیار ناچیزی ناشی از وزن عضو به وجود می آید. لیکن مقدار آن در حدی است که معمولاً در طراحی اعضا می توان از آن در مقابل نیروی محوری صرف نظر کرد. این سازه ها با توجه به شکل ظاهری و نحوه عملکردشان به صورت های شبکه های دو لایه، شبکه های سه لایه، چلیک ها، سازه های گنبدی، سازه های تاشو و ... دسته بندی می شوند [4].

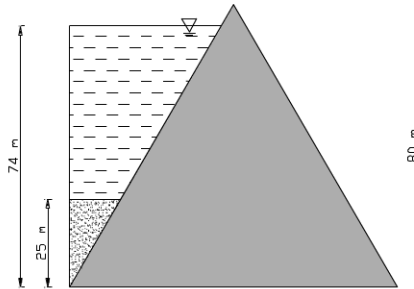
اتصالات در این سازه ها انواع مختلفی دارد که عبارتند از سیستم اتصال گوی سان، سیستم مفصل کاسه ای، سیستم مفصل ورقه ای، سیستم مفصل شیاری. مهمترین و رایج ترین نوع این اتصالات، اتصال گوی سان می باشد. سیستم های گوی سان از عضو سازه ای پیوند دهنده و قطعات اتصال دهنده (چفت و بست دار) تشکیل شده اند. در این نوع اتصال، اعضا به صورت لوله می باشند و هندسه اتصال به گونه ایست که محور لوله ها از مرکز گوی می گذرد. اصولاً وظیفه پیوندها در سازه های فضا کار نگهداری اعضا و انتقال نیرو بین اعضا می باشد. وظیفه اعضا نیز حفظ موقعیت گره ها در فضا و مقاومت در مقابل نیروهای داخلی است [5].

## 2-1. معرفی سازه فضاکار

طراحی پشت بند سازه فضاکار برای پشت بند بتنی شماره 12 سد لتیان صورت گرفته است. عرض این پشت بند 15 متر و ارتفاع آن 84 متر می باشد. با توجه به ابعاد این پشت بند، با استفاده از برنامه Formian شش شبکه شامل سه شبکه مثلثی سه لایه و سه شبکه مثلثی چهار لایه، همگی با اضلاع 92/5 متر و فواصل بین شبکه‌های 3، 2 و 3 و 4 متری مدل شده‌اند. هر ضلع مثلث سازه فضاکار از 37 عضو 2/5 متری تشکیل شده است که با توجه به مساوی بودن طول همه اعضای شبکه اجرای آن بسیار ساده تر خواهد بود. مقاطع سازه از نوع لوله فولادی با قطر و ضخامت های متفاوت می باشد.

## 2. بارهای وارده

بارهای وارده به پشت بند سازه فضاکار طبق بارگذاری فوق العاده USBR در نظر گرفته شده است [6]. مطابق با این بارگذاری پیشنهادی تاثیر بار مرده، نیروهای فشار آب، نیروهای رسوب، نیروی فشار هیدرودینامیکی، بالابرنده، یخ و پایاب در نظر گرفته می شود. با توجه به صرف نظر شدن از نیروهای بالابرنده و یخ در سدهای پشت بنددار و ارتفاع کم پایاب به دلیل فونداسیون مستحکم سد لتیان از تاثیر این نیروها در این تحقیق صرف نظر شده است. مطابق شکل (2) ارتفاع آب 74 متر و ارتفاع رسوب 25 متر (حدود  $H/3$ ) در نظر گرفته شده است. عرض بارگیر پشت بند سازه فضاکار مانند پشت بند بتنی شماره 12 سد لتیان 15 متر فرض شده است. 111 گره در شبکه‌های 3 لایه (37 گره در 3 ردیف) و 148 گره در شبکه‌های 4 لایه (37 گره در 4 ردیف) در معرض مستقیم نیروها قرار دارند.



شکل 2- ابعاد سد به همراه ارتفاع آب و رسوب

## 3. آنالیز و طراحی

بارهای وارده به سد به شش نیروی جداگانه تقسیم شده است که شامل فشار افقی آب، وزن آب (بصورت عمودی)، نیروی افقی رسوب، نیروی هیدرودینامیکی، وزن رسوب و وزن پوسته می باشد که در برنامه SAP2000 به گره های مربوطه وارد شد. نیروی فشار آب متشکل از دو مولفه افقی و قائم می باشد. نیروی افقی آب همان نیروی هیدرواستاتیک

و مولفه قائم این نیرو، که مساوی وزن آب روی بالادست است، در مقایسه با سدهای وزنی به مراتب بیشتر است و یکی از نیروهای مهم در ایجاد پایداری سد پشت‌بنددار می باشد.

توپولوژی های سازه فضاکاری که به عنوان جانشین برای پشت بند مورد مطالعه در نظر گرفته شده است توسط نرم افزار Formian ساخته شده است. این نرم افزار توسط پژوهشکده تحقیقاتی سازه فضاکار مستقر در دانشگاه ساری انگلستان نوشته شده است که اساساً یک زبان برنامه نویسی برای ترسیم توپولوژی سازه های فضاکار و انتقال آن به نرم افزارهای آنالیز و طراحی می باشد. این نرم افزار شامل دستورات ساده ای است که توانایی ترسیم اعضای سازه فضاکار را دارد [7]. در مقاله حاضر توپولوژی سازه فضاکار سه لایه و چهار لایه مورد نظر با این نرم افزار برنامه نویسی شده و برای عملیات آنالیز و طراحی به نرم افزار SAP2000 منتقل شده است. بارگذاری سازه مذکور بر اساس بارگذاری فوق العاده USBR که شامل بارهای مرده، فشار آب، فشار هیدرودینامیکی و فشار رسوب می باشد، در نظر گرفته شده است. بار مرده همان وزن پوسته ی روی سازه فضاکار است که مقدار آن با توجه به نقشه اجرایی پشت بند بتنی محاسبه شده و روی گره ها پخش شده است. نیروهای ناشی از فشار آب به دو مولفه افقی و عمودی تجزیه شده که از روابط زیر محاسبه می شود.

$$F_{VW} = 1.25 \times H_w \times \gamma_w \quad (1)$$

$$F_{HW} = 2.165 \times H_w \times \gamma_w \quad (2)$$

که در روابط بالا  $F_{VW}$  و  $F_{HW}$  بترتیب نیروی افقی و عمودی وارده بر هر گره ناشی از فشار آب و  $H_w$  ارتفاع آب بالای گره و  $\gamma_w$  وزن مخصوص حجم آب می باشد. علاوه بر نیروی فشار آب به دلیل ایجاد رسوب در پای سد، گره های پایینی نیروهای ناشی از این رسوب را تحمل می نمایند. که این نیروها به دو مولفه افقی و عمودی تجزیه شده که از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$F_{VS} = 1.25 \times H_s \times \gamma_s \quad (3)$$

$$F_{HS} = 2.165 \times H_s \times \gamma_s \quad (4)$$

که در روابط بالا  $F_{VS}$  و  $F_{HS}$  بترتیب نیروی افقی و عمودی وارده بر هر گره ناشی از فشار رسوب و  $H_s$  ارتفاع رسوب بالای گره و  $\gamma_s$  وزن مخصوص حجم رسوب می باشد. نیروی دیگری که بر گره های سازه فضاکار وارد می شود نیروی هیدرودینامیک می باشد، که از رابطه زیر برای هر گره محاسبه می شود.

$$F_d = 272 \left[ \frac{H_w}{74} \left( 2 - \frac{H_w}{74} \right) + \left( \frac{H_w}{74} \right) \left( 2 - \frac{H_w}{74} \right) 0.5 \right] \quad (5)$$

که در رابطه بالا  $F_d$  نیرو هیدرو دینامیکی وارد بر هر گره و  $H_w$  ارتفاع آب بالای گره است. پس از انجام آنالیز بر اساس ترکیبات بارگذاری مقرر در آیین نامه اقدام به محاسبه و طراحی اعضای سازه فضاکار شده است. آیین نامه های مورد نظر برای طراحی سازه فضاکار AISC-ASD97 و AISC-LRFD99 می باشد که به ترتیب روش طراحی تنش مجاز و مقاومت نهایی می باشد. مقاطع مورد نظر برای طراحی، مقطع لوله شکل انتخاب شده است. جدول (3) تعدادی مقاطع طراحی شده اعضای این سازه فضاکار را نشان می دهد که اعضا سازه در 10 تیپ مختلف تقسیم بندی شده اند. مقاطع تعریف شده لوله هایی با قطر بین 75-10 سانتی متر و ضخامت بین 8-1 سانتی متر تعریف شده است.

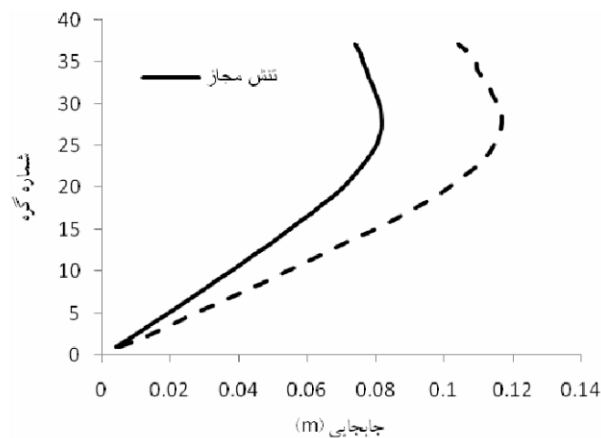
جدول 3- مقاطع طراحی شده اعضای سازه فضاکار

نام مقطع	P1	P5	P8	P14	P19	P24	P33
ضخامت (cm)	8	5	4	4	3	3	2
قطر (cm)	75	60	55	50	45	40	35

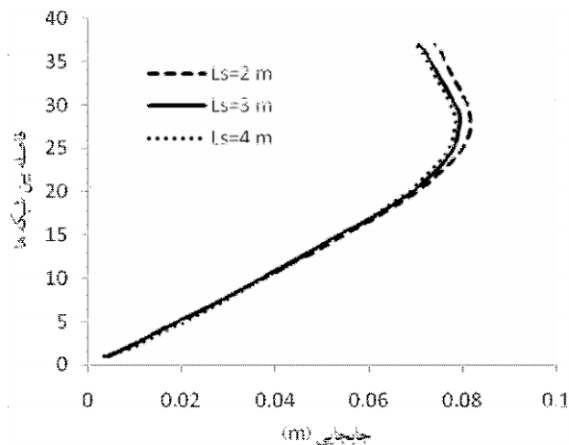
#### 4. بحث و نتیجه گیری

شکل (3) نشان دهنده جابجایی گره های زیر پوسته سد بر اساس آیین نامه ی طراحی تنش مجاز و مقاومت نهایی در شبکه ی 3 لایه با فواصل 2 متر می باشد. به دلیل استفاده از مقاطع ضعیفتر در روش مقاومت نهایی مشاهده میشود که جابجایی ها در این روش نسبت به روش طراحی مجاز بیشتر می باشد. با توجه به نمودار های رسم شده در شکل (3) مشاهده می شود که بیشترین جابجایی مربوط به گره های بالایی سد است. ملاحظه می شود جابجایی بسیار کمی برای سازه ای با این ابعاد می باشد. جابجایی زیاد در پشت بندها باعث ایجاد ترک هایی در پوسته شده و لازم است پشت بندها را تقویت نموده تا دررفت های کمتر حاصل شود. از این جهت سازه فضاکار عملکرد بسیار مناسبی در این مورد خواهد داشت. شکل 4 نمودار جابجایی گره های زیر پوسته سد بر اساس آیین نامه ی طراحی تنش مجاز در شبکه ی 3 لایه با فواصل 2، 3 و 4 متر را نشان می دهد. مشاهده میشود که با بیشتر شدن فاصله ی بین شبکه ها از جابجایی گره ها کاسته میشود ولی این مقدار محسوس نیست. شکل 5 نمودار وزن سازه فضاکار بر اساس آیین نامه ی طراحی تنش مجاز و مقاومت نهایی را نشان می دهد. با توجه به استفاده از مقاطع ضعیف تر در روش طراحی مقاومت نهایی، مشاهده می شود که وزن سازه با استفاده از این روش طراحی در حدود 20 درصد کاهش می یابد. وزن پشت بند بتنی شماره 12 سد لتیان به طور تقریبی برابر 58000 تن می باشد. با مقایسه وزن پشت بند بتنی و سازه فضاکاری، مشاهده می شود که وزن سازه فضاکار بسیار سبکتر می باشد. سدهایی که قرار است در نواحی زلزله خیز ساخته شوند بایستی به گونه ای طراحی گردد تا بتوانند در مقابل نیروهای ناشی از شدیدترین زلزله ی محتمل<sup>7</sup> (MCE) در طول عمر مفیدشان مقاومت کنند. با توجه به این که نوسانات ایجاد شده در اثر زلزله در سد متناسب با وزن سد می باشد می توان به عملکرد بهتر پشت بند سازه فضاکار نسبت به پشت بند بتنی به دلیل وزن بسیار سبک تر پی برد.

<sup>7</sup>Maximum credible earthquake



شکل 3- نمودار جابجایی گره های زیر پوسته سد بر اساس آیین نامه ی طراحی تنش مجاز و مقاومت نهایی در شبکه ی 3 لایه با فواصل 2 متر



شکل 4- نمودار جابجایی گره های زیر پوسته سد بر اساس آیین نامه ی طراحی تنش مجاز در شبکه ی 3 لایه با فواصل 2، 3 و 4 متر

تنش مدل موجود در این مقاله به دو روش تنش مجاز بر اساس آیین نامه AISC-ASD97 و روش مقاومت نهایی بر اساس آیین نامه AISC-LRFD99 طراحی شده اند. جدول 2 نمایش دهنده وزن های پشت بند سازه فضا کار طراحی شده مدل مورد بحث این مقاله می باشد. مشاهده می شود که سازه هایی که بر اساس روش مقاومت نهایی طرح شده اند سبکتر هستند. در ستون انتهایی جدول درصد کاهش وزن سازه طراحی شده بر اساس روش مقاومت نهایی نسبت به روش تنش مجاز مشاهده می شود.

جدول 2- وزن سازه فضاکار طراحی شده بر اساس تنش مجاز و مقاومت نهایی

مدل	وزن با روش طراحی تنش مجاز (kg)	وزن با روش طراحی مقاومت نهایی (kg)	درصد کاهش وزن
3 لایه با فواصل 2 متری	18620832.17	14093436.73	24.3
3 لایه با فواصل 3 متری	19709393.92	14685856.94	25.5
3 لایه با فواصل 4 متری	20401627.05	15043481.87	26.3
4 لایه با فواصل 2 متری	21148396.53	15798173.6	25.3
4 لایه با فواصل 3 متری	21586501.51	16237971.89	24.8
4 لایه با فواصل 4 متری	22023639.04	16519204.87	25.0

در جدول بالا مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لایه‌های شبکه سازه فضاکار، وزن کل پشت‌بند افزایش و با کاهش فاصله بین لایه‌ها وزن پشت‌بند کاهش می‌یابد. لذا مناسب‌ترین طرح برای جایگزینی پشت‌بند بتنی می‌توان از مدل اول که با تعداد و فاصله بین لایه‌های کمتر می‌باشد استفاده کرد.

### 5. تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله علاقه‌مندند تا مراتب سپاسگذاری خود را از انجمن پژوهشگران جوان دانشگاه شهید باهنر کرمان بدلیل حمایت از این پژوهش ابراز دارند.

### 6. منابع

- [1] Davis, C. D and K. E. Sorenson, (1969), "Handbook of Applied Hydraulics", New York, John Wiley and Sons, Inc.
- [2] ابریشمی، ح. و وهاب رجایی، ن.، (1380)، "سدهای بتنی طرح و اجرا"، انتشارات آستان قدس رضوی.
- [3] وب سایت: [www.tw.org.ir/dam](http://www.tw.org.ir/dam)



- [4] اژدری، ف.، (1382)، "بهینه سازی سطح مقطع، هندسه و توپولوژی ستون ها در سازه های فضاکار با محدودیت کماتش با الگوریتم وراثتی"، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- [5] Z. C. Makowki, (1969), "Steel Space Structures", New York, John Wiley and Sons, Inc.
- [6] USBR, (1987), "Design of Small Dams", U. S. Dept. Of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Col.
- [7] Nooshin, H and Disney, P., (2001), "Formex Configuration Processing I, International Journal of Space Structures", VOL. 16, No. 1, 1-56.