

بررسی عددی احتمال کاویتاسیون در انواع سرریزهای پلکانی ساده، لبه‌دار و شیب‌دار

ایمان نادری راد¹، ناصر طالب بیدختی²، امیر حسین نیک سرشت³

۱- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر

۲- استاد بخش عمران دانشگاه شیراز

۳- استادیار بخش مکانیک دانشگاه صنعتی شیراز

iman_ndr@yahoo.com

خلاصه:

هدف از این تحقیق ارزیابی احتمال وقوع کاویتاسیون در انواع سرریز پلکانی ساده، لبه دار و شیب‌دار با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند تعداد پله‌ها (N)، ارتفاع پله‌ها (S)، طول پله‌ها (l)، دبی در واحد عرض (q)، میزان افزایش ارتفاع پله‌ها (m)، شیب سرریز (α) حتی تاثیر نوع جریان بوسیله روش عددی می‌باشد. در این تحقیق تاثیر هر یک از پارامترهای نام برده شده بر احتمال خطر کاویتاسیون در انواع سرریز پلکانی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر وجود فشارهای منفی عاملی برای شروع کاویتاسیون در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی عددی سرریزهای پلکانی در تحقیق حاضر از روش احجام محدود استفاده شده برای مدل سازی سطح آزاد جریان از روش VOF و مدل سازی آشفتگی جریان از مدل $k - \epsilon$ استاندارد گردیده است. برای تقریب مقادیر پارامترهای مورد نظر از روش قاعده توانی استفاده شده است.

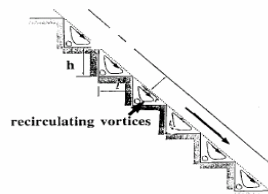
واژه‌های کلیدی: سرریز پلکانی ساده، لبه دار و شیب دار، جریان ریزشی، جریان پیوسته، جریان تبدیلی، کاویتاسیون و روش عددی

مقدمه:

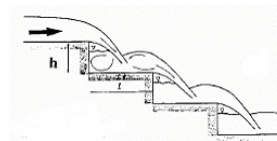
کاویتاسیون پدیده ای دینامیکی است که در اثر کاهش فشار سیال به مقادیر پایین تر از فشار بخار سیال در دمای معین، در سازه های هیدرولیکی به وقوع پیوسته و ایجاد خسارات فراوان و حتی تخریب سازه می نماید. این پدیده خطری است که سازه های هیدرولیکی در معرض سرعت بالا و افت فشار موضعی را همواره تهدید می کند. کاویتاسیون ناشی از کاهش فشار موضعی، در درجه حرارت ثابت است. کاهش فشار موضعی در جریان سیال ناشی از عواملی مانند: کاهش انرژی کل به عنوان افزایش در تراز، افزایش سرعت موضعی (برای مثال به دلیل تنگ شدن مجرا) و همچنین به دلیل آشفتگی، تشکیل گرداب یا جداسازی زیاد جریان می تواند باشد. با کاهش فشار به طور پیوسته در جریان سیال به علت افزایش سرعت (برای مثال روی تاج سرریز) به شرایط بحرانی می‌رسیم که در آن کاویتاسیون آغاز می‌شود [۱].

انواع جریان در سرریز پلکانی:

۱- شکل (۱) جریان ریزشی (Nappe Flow) که در آن جریان به صورت جت آزاد به پله پایینی برخورد کند را نمایش می دهد.



شکل (۲) - جریان پیوسته در سرریز پلکانی



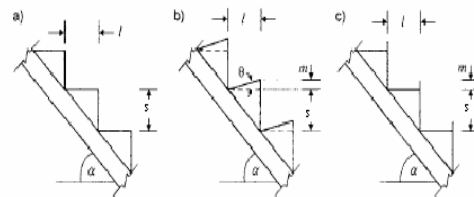
شکل (۱) - جریان ریزشی در سرریز پلکانی

۲- شکل (۲) جریان پیوسته (Skimming Flow) که در آن جریان حالت ریزشی آزاد نداشته و از روی پله ها عبور می کند را نمایش می دهد.

۳- جریان تبدیلی (Transition Flow) همواره ما بین جریان ریزشی و پیوسته شکل می‌گیرد. و جریان دارای شکل و حالت مشخصی بر روی سرریز نمی‌باشد.

انواع سرریز پلکانی:

سرریز های پلکانی به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.
 ۱- سرریز پلکانی با پله ساده، ۲- سرریز پلکانی با پله لبه‌دار، ۳- سرریز پلکانی با پله شیب‌دار
 شکل (۳) هر سه نوع سرریزهای پلکانی را نمایش می‌دهد. در شکل (۴) پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع پله‌ها (s)، طول پله‌ها (l) و میزان افزایش ارتفاع پله‌ها (m) که به دلیل لبه‌دار شدن یا شیب‌دار شدن کف پله‌ها ایجاد می‌شود قابل مشاهده می‌باشد [۲].



شکل (۳)- انواع سرریز پلکانی

روابط حاکم بر میدان جریان:

قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله ممنتوم در جهات محوره‌های سه گانه مختصات که به معادلات ناویه-استوکس معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و ممنتوم به بیان ریاضی می‌باشند. بر اساس دیدگاه اولری، چنانچه جزء کوچکی از سیال به عنوان حجم کنترل ثابت در فضای محاسباتی در نظر گرفته شود، در این صورت نیروهای وارده بر آن و اصل بقای جرم در این سلول به صورت معادلات مشتق جزئی نمایان می‌شوند. در جریان تراکم‌ناپذیر قوانین فوق به صورت زیر بیان می‌شود [۳]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در معادلات فوق، u_i و x_i به ترتیب سرعت و مختصات، t زمان، p فشار، ρ دانسیته و t_{ij} تانسور تنش‌های ناشی از ویسکوزیته است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$t_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (3)$$

μ ویسکوزیته ملکولی و S_{ij} تانسور نرخ تغییر کرنش می‌باشد.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

برای ساده کردن روند میانگین‌گیری زمانی، ترم انتقالی در معادله (۲) را به فرم بقایی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) - u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji}) \quad (6)$$

در بدست آوردن رابطه (۳) از معادله بقای جرم در حذف ترم استفاده شده است. با ترکیب معادلات (۱) تا (۲) معادله ناویه-استوکس به فرم بقایی بدست می‌آید. با استفاده از روش میانگین‌گیری زمانی در مورد معادلات (۱) و (۲)، معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز به فرم بقایی زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji}) \quad (8)$$

معادله بقای جرم در حالت اخیر همان معادله اولیه (معادله (۱)) است که سرعت متوسط جایگزین سرعت لحظه‌ای شده است. گذشته از جایگزینی سرعت متوسط بجای سرعت لحظه‌ای در معادلات اخیر، تنها تفاوت بین معادله اندازه حرکت در حالت میانگین‌گیری شده زمانی با معادله اندازه حرکت در حالت لحظه‌ای (معادله (۲)) ظاهر شدن ترم $\overline{u'_j u'_i}$ است. این ترم بیان‌کننده نرخ متوسط زمانی انتقال اندازه حرکت به دلیل اغتشاش است. بدین ترتیب ترم تولیدکننده اغتشاش وارد معادلات حاکم بر جریان می‌شود. معادله (۸) با استفاده از معادله ۳ به شکل معکوس به فرم معمول آن که در بسیاری از مراجع با این فرم در نظر گرفته می‌شود، بازنویسی

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (9)$$

معادله (۹) به نام معادله نایوه- استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز شناخته می‌شود. کمیت $-\rho \overline{u'_j u'_i}$ ، همان تانسور تنشهای رینولدز است که با $\rho \tau_{ij}$ نشان داده می‌شود. τ_{ij} تانسور ویژه تنشهای رینولدز است.

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} \quad (10)$$

ترم فوق به تنش رینولدز معروف بوده که در سیستم معادلات سه بعدی، باعث افزودن ۶ مجهول دیگر به معادلات می‌شود. جهت بستن دستگاه معادلات حاکم و به عبارت بهتر برقراری ارتباط بین تنش‌های رینولدز و مولفه‌های سرعت متوسط جریان، از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد وسیع مدل‌های دو معادله‌ای، در این مقاله نیز از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. شرط مرزی دینامیکی و سینماتیکی ذرات ارضاء شود که شرط دینامیکی عملاً همان شرط پیوستگی فشار در سطح آزاد است که به صورت خود به خود در حل معادله نایوراستوکس در سلول‌های دو فازی اعمال می‌شود ولی شرط سینماتیکی که بیان‌کننده حرکت سطح آزاد سیال می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \partial_t \alpha + \vec{V} \cdot \nabla \alpha = 0.0 \quad (11)$$

که در این معادله α به عنوان نسبت حجمی یک سیال مرجع در هر سلول نسبت به حجم هر سلول در نظر گرفته می‌شود. اگر سلولی از سیال مرجع کاملاً پر باشد مقدار α برابر یک می‌شود و اگر سلولی خالی از سیال مرجع باشد مقدار α برابر صفر می‌شود بنابراین در سلول‌هایی که قسمتی از آنها با سیال مرجع پر شده باشد مقدار α بین صفر و یک می‌باشد.

به تعبیر دیگر این معادله مشخصه قانون بقای حجم یک فاز نیز می‌باشد که در آن \vec{V} بردار سرعت سیال است. همچنین خصوصیتی مانند دانسیته و ویسکوزیته در سلول‌های میانی دو سیال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

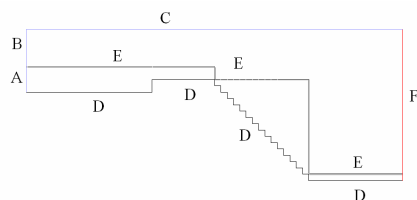
$$\rho^* = \sum \alpha_q \rho_q \quad \mu^* = \sum \alpha_q \mu_q \quad (12)$$

که ρ_q و μ_q دانسیته و ویسکوزیته هر فاز و ρ^* و μ^* دانسیته و ویسکوزیته میانگین در سلول‌های دو فازی می‌باشد. در این روش یک معادله اندازه حرکت برای هر دو فاز در کل میدان حل می‌شود و سرعت بدست آمده در سلول‌های دو فازی برای هر دو سیال یکی در نظر گرفته می‌شود. ولی مقادیر ρ و μ در این معادله به نسبت حجمی سیال‌های موجود در حجم کنترل بستگی دارد

شبکه بندی، شرایط مرزی و انفصال معادلات :

برای مش بندی مدل‌های ساخته شده از مش بندی منظم استفاده شده است و اندازه مش‌ها بعد از انتخابها و آنالیزهای متعدد ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این سائز از مشها رعایت میزان $y^+ > 300$ در لایه‌های مرزی دیواره‌ها و جریان بوده است زیرا برای مدل سازی دیواره‌ها از توابع دیوار استاندارد استفاده شده است که باید رابطه $300 < y^+ < 30$ برقرار باشد. برای حل معادلات جریان از نرم افزار FLUENT استفاده شده است. در این تحقیق برای مدل سازی عددی سرریزهای پلکانی از روش احجام محدود استفاده شده است و برای تقریب و انفصال مقادیر پارامترهای

مورد نظر از روش قاعده توانی استفاده شده است. جهت کوپل کردن ترم های سرعت و فشار، الگوریتم تکراری SIMPLE بکار گرفته شده است و حل میدان جریان تا رسیدن باقیمانده‌ها به مقدار 10^{-6} ادامه داشته است. در این تحقیق جریان به صورت غیردائمی آنالیز شده است و آنقدر اجرای برنامه ادامه داده شده است تا جریان به حالت دائمی تبدیل شود. در مدل عددی سرریز پلکانی از شرایط مرزی که در شکل (۴) ارائه شده است استفاده گردیده است.



شکل (۴) - شرایط مرزی و مدل سازی عددی سرریز پلکانی

در شکل (۴) شرایط مرزی سرعت جریان ورودی، B شرایط مرزی هوای ورودی که بصورت فشار صفر، C شرایط مرزی هوای ورودی که بصورت فشار نسبی صفر، D شرایط مرزی دیوارها است، F شرایط مرزی خروجی می باشد که به صورت فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است و E شرایط اولیه پروفیل سطح جریان در سرریز پلکانی می باشد. در مدل های ساخته شده در این پایان نامه طول مخزن ۱ متر، پایین دست سرریز ۱ متر، ارتفاع مخزن هم حدود ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع مجموع A و B در مدل ها ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

مدل های عددی ساخته شده:

هدف از این تحقیق ارزیابی احتمال کاویتاسیون در انواع سرریز پلکانی ساده، لبه دار و شیب دار با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند تعداد پله ها (N)، ارتفاع پله ها (S)، طول پله ها (L)، دبی در واحد عرض (q)، میزان افزایش ارتفاع پله ها (m) و شیب سرریز (α) بوسیله روش عددی می باشد. در این تحقیق تاثیر هر یک از پارامترهای نام برده شده بر احتمال خطر کاویتاسیون در انواع سرریز پلکانی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق وجود فشارهای منفی عاملی برای شروع کاویتاسیون در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر ۱۱ گروه سرریز پلکانی ساخته شده است که هر گروه برای سه دبی مختلف مورد آنالیز عددی قرار گرفته اند.

در جدول (۱) مشخصات هندسی، نوع جریان و بیشترین فشار منفی در مدل های عددی سرریز پلکانی ساده ارائه شده است. برای آنالیز سرریزهای پلکانی ساده ۵ گروه مدل در نظر گرفته شده اند که هر گروهی برای سه دبی در واحد عرض (q) $0.0190, 0.037, 0.0987$ متر مکعب بر ثانیه بر واحد عرض، ارتفاع طراحی سرریز (H_d) $0.05, 0.1, 0.15$ متر و y_c ارتفاع بحرانی $0.334, 0.667, 0.987$ متر آنالیز شده اند. در سه گروه ۱، ۲ و ۳، فقط ارتفاع پله ها تغییر نموده اند برای سه حالت گروه ۱ ارتفاع پله ها (S) 0.1 متر تعداد پله ها ۸ و شیب سرریز $63/34$ درجه، گروه ۲ ارتفاع پله ها (S) 0.05 متر، تعداد پله ها (N) ۱۶ و شیب سرریز (α) ۴۵ درجه و گروه سوم ارتفاع پله ها 0.25 متر، تعداد پله ها (N) ۳۲ و شیب سرریز (α) $26/56$ درجه در نظر گرفته شده است. در هر سه گروه ارتفاع سد (H_{dam}) 0.8 متر و طول پله (L) 0.05 متر بوده است. در گروه ۴ و ۵ فقط طول پله ها تغییر کرده است. در هر دو گروه ۴ و ۵ ارتفاع پله ها (S) 0.1 متر، تعداد پله ها (N) ۸، ارتفاع سد (H_{dam}) 0.8 متر ثابت بوده است. در گروه ۴ طول پله (L) 0.075 متر و در گروه ۵ طول پله ها (L) 0.1 متر در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) و (۳) به ترتیب مشخصات هندسی، نوع جریان و بیشترین فشار منفی در مدل های عددی سرریز پلکانی شیب دار و لبه دار ارائه شده است. برای آنالیز سرریزهای پلکانی لبه دار و شیب دار هر کدام ۳ گروه مدل در نظر گرفته شده اند که هر گروهی برای سه دبی در واحد عرض (q) $0.0190, 0.037, 0.0987$ متر مکعب بر ثانیه بر واحد عرض ارتفاع طراحی سرریز (H_d) $0.05, 0.1, 0.15$ متر و y_c ارتفاع بحرانی $0.334, 0.667, 0.987$ متر آنالیز شده اند. در سه گروه ۶، ۷ و ۸ فقط میزان افزایش ارتفاع پله ها (m) به ترتیب $0.1, 0.2, 0.3$ متر تغییر کرده است که باعث شیب دار شدن پله ها شده است.

در شکل های (۵)، (۶)، (۷)، (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) پروفیل جریان شکل گرفته شده در مدل ها را می توان مشاهده نمود. پروفیل های سطح جریان به دست آمده از آنالیزهای عددی که دارای سطحی کاملاً صاف و بدون انحنا و تغییر باشند جریان پیوسته نامیده شده اند و جریان هایی که دارای تغییر شکل در سطح جریان را دارا می باشند جریانهای تبدیلی نامیده شده اند. جریانهایی که دارای حالت ریزشی از روی پله هستند جریانهای ریزشی نامگذاری شده اند.

جدول (۱) - مشخصات هندسی، نوع جریان و بیشترین فشار منفی در مدل های عددی سرریز پلکانی ساده

گروه	$H_d(m)$	$q(\frac{m^3}{m^2s})$	$y_c(m)$	$S(m)$	$L(m)$	H_{dam}	N	نوع جریان	بیشترین فشار منفی (pa)	α (درجه)
۱	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۱	۰/۰۵	۰/۸	۸	NA	-۹۴۸	۶۳/۳۴
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۸	۸	TR	-۱۷۵۰	۶۳/۳۴
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۸	۸	SK	-۲۱۰۰	۶۳/۳۴
۲	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۴۱۴	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۷۹۳	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۱۳۵۰	۴۵
۳	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۸	۳۲	SK	-۱۷۱	۲۶/۵۶
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۸	۳۲	SK	-۲۸۸	۲۶/۵۶
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۸	۳۲	SK	-۵۴۳	۲۶/۵۶
۴	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۸	۸	NA	-۸۱۵	۵۳/۱۳
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۸	۸	TR	-۱۲۰۰	۵۳/۱۳
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۸	۸	SK	-۱۵۵۰	۵۳/۱۳
۵	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۱	۰/۱	۰/۸	۸	NA	-۷۲۳	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۱	۰/۱	۰/۸	۸	TR	-۸۸۲	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۸	۸	SK	-۱۱۰۰	۴۵

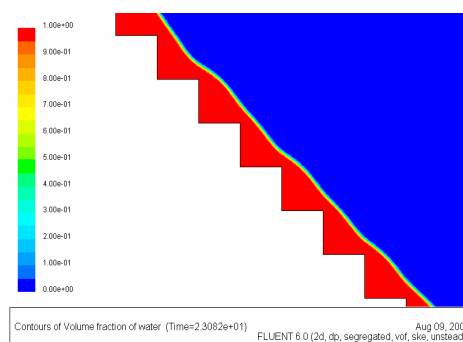
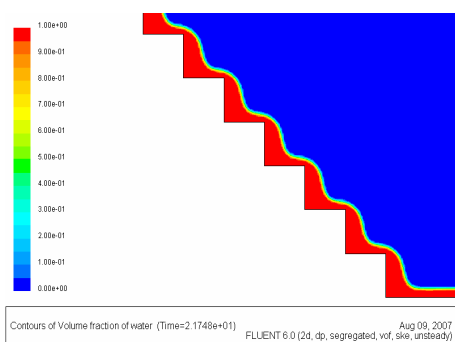
در جداول (۱)، (۲) و (۳) TR نماینده جریان Transition، SK نماینده جریان Skimming و NA نماینده جریان Nappe می‌باشد.

جدول (۲) - مشخصات هندسی، نوع جریان و بیشترین فشار منفی در مدل عددی سرریز پلکانی شیب دار

گروه	$H_d(m)$	$q(\frac{m^3}{m^2s})$	$y_c(m)$	$S(m)$	$L(m)$	H_{dam}	N	نوع جریان	بیشترین فشار منفی (pa)	θ (درجه)	α (درجه)
۶	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	TR	-۴۱۱	۱۱/۳	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۷۳۰	۱۱/۳	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۱۳۲۷	۱۱/۳	۴۵
۷	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	TR	-۳۹۰	۲۱/۸	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۵۸۰	۲۱/۸	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۱۱۳۵	۲۱/۸	۴۵
۸	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	TR	-۴۲۴	۳۰/۹۶	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۵۰۹	۳۰/۹۶	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۸۴۶	۳۰/۹۶	۴۵

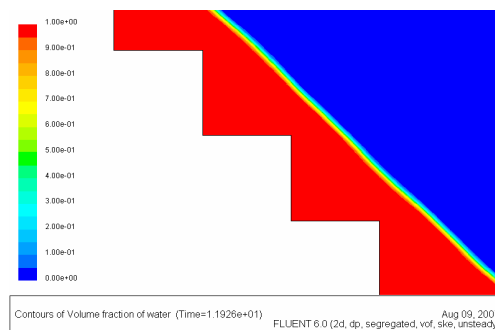
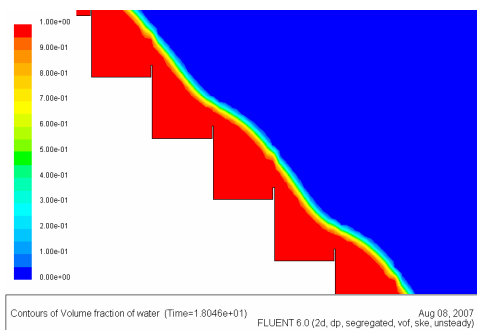
جدول (۳) - مشخصات هندسی، نوع جریان و بیشترین فشار منفی در مدل عددی سرریز پلکانی لبه‌دار

گروه	$H_d (m)$	$q \left(\frac{m^3}{m \cdot s} \right)$	$y_c (m)$	$S(m)$	$L(m)$	H_{dam}	N	نوع جریان	بیشترین فشار منفی (pa)	$m(m)$	α (درجه)
۹	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	TR	-۸۶۹	۰/۰۱	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۶۲۰	۰/۰۱	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۱۱۴۲	۰/۰۱	۴۵
۱۰	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	TR	-۶۸۱	۰/۰۲	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۴۳۹	۰/۰۲	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۸۷۱	۰/۰۲	۴۵
۱۱	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	TR	-۴۳۳	۰/۰۳	۴۵
	۰/۱	۰/۰۵۳۷	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۴۵۵	۰/۰۳	۴۵
	۰/۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸	۱۶	SK	-۴۷۸	۰/۰۳	۴۵



شکل (۶) - پروفیل جریان از نوع جریان ریزشی در سرریز پلکانی ساده

شکل (۵) - پروفیل تبدیلی در سرریز پلکانی ساده

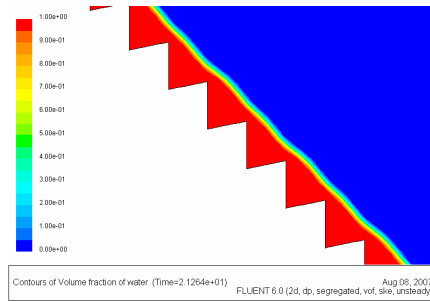


شکل (۸) - پروفیل جریان از نوع جریان تبدیلی در سرریز پلکانی لبه‌دار

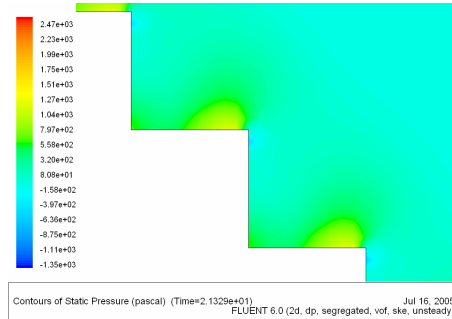
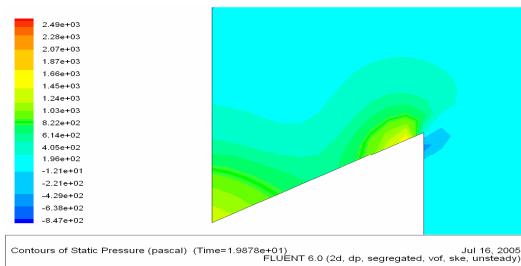
شکل (۷) - پروفیل جریان پیوسته در سرریز پلکانی ساده

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) میدان فشارهای در انواع مدل‌های سرریز پلکانی را می‌توان مشاهده نمود. در نتایج به دست آمده از روش عددی می‌توان میدانهای فشار در سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داد. در سرریزهای پلکانی میدان فشارهای منفی در لبه پله‌ها تشکیل شده است و بیشترین فشار در کف پله‌ها رخ داده است. نتایج آنالیزهای عددی در سرریزهای پلکانی لبه‌دار در شکل (۱۲) به صورت نمودار قابل مشاهده می‌باشد. افزایش ارتفاع لبه پله‌ها در حالتی که تعداد پله‌ها و شیب سرریز ثابت باشد باعث کاهش فشار منفی نسبت به حالت ساده می‌شود. در حالتی که $\frac{y_c}{N * S}$ برابر ۰/۰۴۱ می‌باشد. این مطلب که لبه دار کردن پله باعث کاهش فشار منفی در مدلها می‌شود را نقض کرده است. این تغییر حالت نمودار به دلیل تغییر نوع جریان از حالت پیوسته در سرریز پلکانی ساده به جریان تبدیلی در حالت سرریز لبه دار است. در شکل (۹) هم نمایش داده

شده است جریان از پروفیل یکنواختی برخوردار نیست و شکل یکسانی به خود نگرفته است این دلیل تغییر اصلی میدان فشار نسبت به حالت ساده می باشد.



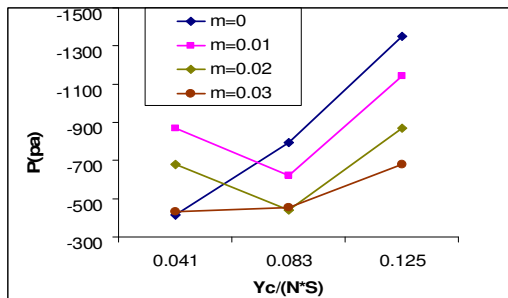
شکل (۹) - پروفیل جریان از نوع جریان تبدیلی در سرریز پلکانی شیبدار



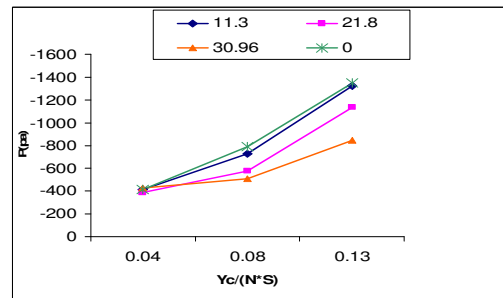
شکل (۱۱) - کانتورهای فشار در مدل سرریز پلکانی شیبدار

شکل (۱۰) - کانتورهای فشار در مدل سرریز پلکانی ساده

نتایج آنالیزهای عددی در سرریزهای پلکانی شیبدار در شکل (۱۳) به صورت نمودار قابل مشاهده می باشد. افزایش شیب کف پله ها در حالتی که تعداد پله ها و شیب سرریز ثابت باشد باعث کاهش فشار های منفی می شود. در حالتی که $\frac{y_c}{N * S}$ برابر 0.41 می باشد این مطلب که شیب دار کردن پله باعث کاهش فشار منفی در مدلها می شود را تا حدود زیادی نقض کرده است و یا تغییری در میدان فشار ایجاد نشده است این تغییر حالت نمودار به دلیل تغییر نوع جریان از حالت پیوسته در سرریز پلکانی ساده به جریان تبدیلی در حالت سرریز شیب دار است. در جریان تبدیلی که در شکل (۸) هم نمایش داده شده است جریان از پروفیل یکنواختی برخوردار نیست و دارای نوسان می باشد جریان از نوع تبدیلی - پیوسته می باشد این دلیل اصلی تغییر میدان فشار نسبت به حالت ساده می باشد و جریان به طور کامل به صورت تبدیلی در نیامده است و جریان بیشتر به حالت پیوسته شبیه است.



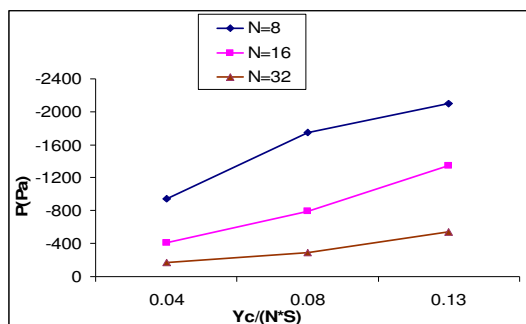
شکل (۱۳) - نمودار تغییرات شیب کف پله در سرریز پلکانی لبه دار



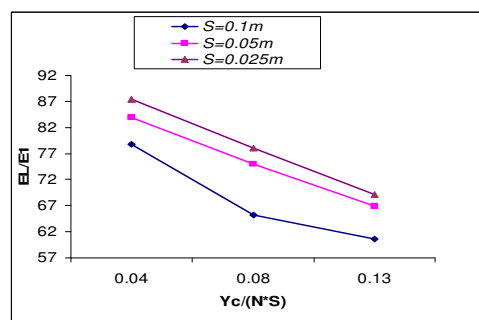
شکل (۱۴) - نمودار تغییرات ارتفاع لبه پله در سرریز پلکانی شیبدار

همواره جریان تبدیلی یا جریان تبدیلی - ریزشی و جریان تبدیلی - پیوسته روند مشخصی از نظر تغییرات میدان فشار در مدلها ایجاد نمی نمایند. نتایج آنالیزهای عددی در سرریزهای پلکانی ساده در شکل (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به صورت نمودار قابل مشاهده می باشد. شکل (۱۴)

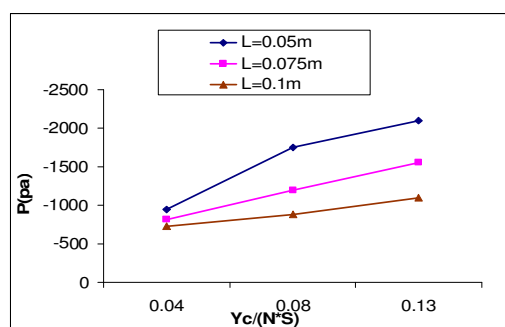
تغییرات ارتفاع پله در سرریز پلکانی ساده را نمایش می‌دهد که با کاهش ارتفاع پله‌ها مقدار فشارهای منفی نیز کاهش یافته است. شکل (۱۵) تغییرات تعداد پله در سرریز پلکانی ساده را نمایش می‌دهد که با افزایش تعداد پله‌ها مقدار فشارهای منفی نیز کاهش یافته است. شکل (۱۶) تغییرات شیب در سرریز پلکانی ساده را نمایش می‌دهد که با کاهش شیب در سرریز پلکانی مقدار فشارهای منفی نیز کاهش یافته است. شکل (۱۷) تغییرات طول پله در سرریز پلکانی ساده را نمایش می‌دهد که با افزایش طول پله در سرریز پلکانی مقدار فشارهای منفی نیز کاهش می‌یابد.



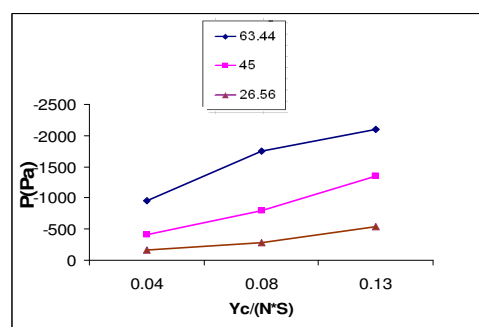
شکل (۱۵) - نمودار تغییرات تعداد پله ها در سرریز پلکانی ساده



شکل (۱۴) - نمودار تغییرات ارتفاع پله در سرریز پلکانی ساده



شکل (۱۷) - نمودار تغییرات طول پله در سرریز پلکانی ساده



شکل (۱۶) - نمودار تغییرات شیب در سرریز پلکانی ساده

نتیجه گیری:

از آنالیزهای عددی می‌توان به نتایج زیر رسید
 افزایش تعداد پله‌ها وقتی که ارتفاع سد ثابت باشد در سرریزهای پلکانی باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود. کاهش ارتفاع پله‌ها وقتی که ارتفاع سد ثابت باشد در سرریزهای پلکانی ساده باعث کاهش خطر کاویتاسیون خواهد شد. کاهش شیب سرریزهای پلکانی وقتی که ارتفاع سد ثابت باشد باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود. افزایش ارتفاع لبه پله‌ها وقتی که ارتفاع سد، تعداد، طول، ارتفاع پله‌ها و شیب سرریز ثابت باشد در سرریزهای پلکانی لبه‌دار باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود. افزایش شیب کف پله‌ها وقتی که ارتفاع سد، تعداد، طول، ارتفاع پله‌ها و شیب سرریز ثابت باشد در سرریزهای پلکانی شیب دار باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌شود. افزایش طول پله‌ها در حالتی که تعداد و ارتفاع پله‌ها ثابت باشد در سرریزهای پلکانی باعث کاهش خطر کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی خواهد بود. افزایش دبی در هر سه حالت سرریزهای پلکانی باعث افزایش خطر کاویتاسیون خواهد شد. و تغییرات میدان فشار از نوع جریان مستقل نمی‌باشد. همواره جریان‌های تبدیلی که دارای پروفیل جریان‌های نامشخصی می‌باشند باعث ایجاد میدان‌های فشار نامنظمی در روی سرریزها می‌شوند و رفتار مناسب و منظمی از این نوع جریان‌ها در سرریز پلکانی دیده نشده است.

مراجع:

- 1-Vischer, D.L., and Hager, H.W. (1999). Dam Hydraulics. John Wiley and Sons.
- 2-Chamani, M.R., and Rajaratnam, N. (1999). "Characteristics of skimming flow over stepped spillways." *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol.125, No.4, 361-367.
- 3 - Chinnarasri, C., and Wongwisess, S. (2006). "Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, Vol.132, No.1, 70-76.
- 4- Fluent User's Guide, Fluent Inc. (2001).