

مدل اویلری اندرکنش آب سد با دریچه قطاعی در اثر زمین لرزه و بررسی شاخص های موثر بر آن

سید امیرالدین صدرنژاد و نورعلی شیرمردی

چکیده: هدف این مقاله مطالعه عددی بصورت مدل اویلری اندرکنش آب سد با دریچه رادیال در اثر زمین لرزه و بررسی شاخص های موثر در آن می باشد. طبق تعریف اندرکنش بصورت کنش و واکنش دو محیط مجاور هم ارائه شده است. بنابراین دو محیط مجاور هم مانند سیال و سازه در هنگام زلزله اثرات متقابل بر هم دارند. مطالعات انجام گرفته در این زمینه عموماً در قالب اندرکنش مخزن و سد می باشد. در این تحقیق در راستای دستیابی به امکان پیش بینی فشار هیدرودینامیک وارد بر سطح منحنی دریچه در هنگام زلزله ابتدا مروری بر روش های متداول تحلیلی و تجربی محاسبه فشار هیدرودینامیک در هنگام زلزله ارائه شده و سپس انواع روش های عددی معرفی و در نهایت با استفاده از روش عددی اویلر- لاگرانژ در قالب استفاده از یک نرم افزار عمومی مانند ANSYS مدل پیشنهادی اندرکنش آب و دریچه ارائه گردیده است. در این مقاله نتایج بدست آمده از تاثیر پارامترهایی همچون میرایی سازه، صلبیت دریچه، تراکم ناپذیری سیال و تاثیر افزایش عمق بر فشار هیدرودینامیک در اثر تحریک افقی مورد بررسی قرار گرفته خواهد شد.

واژه های کلیدی: دریچه شعاعی، اندرکنش آب، زلزله، روش اویلری، افزایش فشار آب وارد بر دریچه

۱. مقدمه

در هنگام وقوع زلزله آب پشت سازه به دلیل نیروی برشی ناچیز بین کف مخزن و محیط مخزن مستقیماً تحت تاثیر حرکت زمین قرار نمی گیرد و تنها در اثر ارتعاش سازه در محیط مخزن امواج فشار هیدرودینامیک ایجاد می شوند که خود تابعی از حرکت سازه می باشند. به این ترتیب دستگاه معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سد و فشار هیدرودینامیک در محیط سیال مستقل از یکدیگر نبوده و بصورت همبسته (coupled) می باشند. مطالعات انجام گرفته عموماً در مورد اندرکنش سد و مخزن می باشند. Westergard در سال ۱۹۳۳

در مقاله ای تحت عنوان «فشار آب بر سدها در هنگام وقوع زلزله» برای نخستین بار به طور تحلیلی فشار هیدرودینامیک آب بر روی سدهای بتنی وزنی را تحت اثر حرکت هارمونیک افقی پی سد محاسبه نمود [1]. پس از وی Kotsubo در سال ۱۹۶۰ به بررسی این مساله پرداخت و نشان داد که حل Westergard تنها برای ارتعاشاتی با فرکانس هایی کمتر از فرکانس طبیعی مخزن صادق است [2]. Chopra در سال ۱۹۶۸ محدودیت فرمول Westergard در پیروی ارتعاش زمین را رفع کرد همچنین وی توزیع فشار هیدرودینامیک در اثر ارتعاش قائم را مورد بررسی قرار داد [3]. Zienkiewicz نیز در مطالعات خود با فرض یک بعدی بودن جریان توزیع فشار هیدرودینامیک را مورد بررسی قرار داد [4]. محققانی همچون Zangar با فرض تراکم ناپذیری سیال توانست که معادلات حاکم بر سیال با معادلات حاکم بر پدیده های فیزیکی همچون توزیع میدان الکتریکی شبیه سازی نموده و با ساخت مدل های

مقاله در تاریخ ۱۳۸۰/۸/۵ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۱۱/۲۴ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر سید امیرالدین صدرنژاد دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sadmejad@hotmail.com
نورعلی شیرمردی کارشناس ارشد مهندسی عمران

۲. نظریه اویلر - لاگرانژ [5]

در حالت کلی معادله دینامیکی حاکم بر یک سازه خطی به صورت زیر است:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

که در آن $[M]$ = ماتریس جرم سازه و $[C]$ = ماتریس استهلاک سازه و $[K]$ = ماتریس سختی سازه و $\{\ddot{U}\}$ = بردار شتاب گرهی و $\{\dot{U}\}$ = بردار سرعت گرهی و $\{U\}$ = بردار تغییر مکان گرهی و $\{F\}$ = بردار بار موجود می‌باشند.

در مسائل اندرکنش سیال با سازه لازم است که معادله دینامیکی سازه همراه با معادلات ممتنم سیال و معادله پیوستگی جریان در نظر گرفته شود. با ساده سازی معادلات ممتنم سیال و معادله پیوستگی، معادله هلمهولتز با فرضیات زیر بدست می‌آید.

- ۱- سیال تراکم پذیر است.
 - ۲- سیال غیر لزج است.
 - ۳- تغییر شکلهای محیط سیال کوچک است.
 - ۴- چگالی در سرتاسر محیط سیال یکنواخت است.
- در این صورت معادله هلمهولتز عبارت است از:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

که در آن P فشار هیدرودینامیک و C سرعت صوت در سیال می‌باشد. برای مسائل اندرکنش سازه - سیال می‌بایست معادلات (۱) و (۲) را به طور همزمان در نظر گرفت و حل نمود. چنانچه فشار به صورت هارمونیک (همساز) تغییر نماید:

$$P = \bar{P} e^{i\omega t} \quad (3)$$

\bar{P} = دامنه فشار و ω = فرکانس تحریک بر حسب rad/sec می‌باشند. با جایگذاری (۳) در (۲) معادله هلمهولتز به صورت زیر است:

$$\frac{\omega^2}{C^2} \bar{P} + \nabla^2 P = 0 \quad (4)$$

عملگرهای ماتریسی گرادبان و دایورژانس برای استفاده در معادله (۲) به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\nabla \cdot () = \{L\}^T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right] \quad (5)$$

$$\nabla () = \{L\} \quad (6)$$

بنابراین معادله (۲) رامی‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla \cdot \nabla P = 0 \quad (7)$$

آزمایشگاهی با استفاده از این شبیه سازی فشارهای هیدرودینامیک وارد بر سد را بدست آورد. به موازات روشهای تحلیلی با در دسترس قرار گرفتن کامپیوترها در دوره اخیر استفاده از روش اجزای محدود برای تحلیل سیستمهای سد و مخزن بطور گسترده‌ای متداول گردید. Xue در سال ۲۰۰۱

[6] تحقیقاتی در مورد اندرکنش موج-موج و موج با سازه در جهت بدست آوردن افزایش فشار بر سطح سازه انجام داده است. نتایج تجربی در این مورد بر روی صفحه تخت بوسیله Molin در سال ۲۰۰۴ [7],[8] و همچنین [11], [12] ارائه شده است. اثر افزایش عمق را می‌توان در کارهای Hammack در سال ۲۰۰۳ [9] جستجو نمود. Jamois در سال ۲۰۰۴ [10] نوسانات سطح آب را در اثر موج مورد بررسی قرار داد.

بطور کلی در روشهای عددی دو شیوه متفاوت برای تحلیل و تعیین مجهولات گره‌ای در محیط سیال بکار گرفته می‌شود. در شیوه نخست که بر اساس روابط حاکم بنام روش لاگرانژ - لاگرانژ موسوم است، مجهول گره‌ای محیط سیال همانند محیط سازه همان تغییر مکان در نظر گرفته می‌شود. با این تفاوت که مدول برشی سیال مساوی صفر منظور می‌گردد. معایت عمده این روش وجود مدهای چرخشی و مدهای با فرکانس صفر و همچنین مشکل اعمال شرط مرزی مناسب برای مرز مشترک بین آب و سازه است. شیوه دوم که بر اساس روابط حاکم بنام روش اویلر - لاگرانژ موسوم است، مجهول گره‌ای در محیط سیال فشار هیدرودینامیک و مؤلفه‌های سرعت و دانسیته انتخاب می‌شود. در این روش ماتریس‌های جرم و میرایی و سختی سیستم به شکل نامتقارن و غیر بانندی بدست می‌آیند و حل دستگاه معادلات سیستم به حجم بالایی از محاسبات نیاز دارد. این روش به صورت وسیعی استفاده می‌شود و دارای این مزیت می‌باشد که تعداد متغیرهای کمتری برای حرکت سیال در معادلات وارد می‌شود و با فرضیات خاص تنها مجهول گره‌ای فشار می‌باشد. در این روش اگر از تراکم ناپذیری سیال صرف‌نظر شود، روش بسیار موثری می‌باشد. روش مورد مطالعه برای اندرکنش آب سد و دریچه روش اویلر - لاگرانژ می‌باشد که با استفاده از نرم افزار ANSYS این مدل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

در این مقاله اثر پارامترهایی همچون میرایی، صلبیت، تراکم ناپذیری سیال و تاثیر افزایش عمق و فاصله محل افزایش بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه در اثر مولفه افقی زلزله ارائه خواهد شد.

مولفه‌های تغییر مکان گرهی و $\{n\}$ بردار عمود بر مرز سیال می‌باشند.

علمگر ماتریس $\{L\}$ بر توابع شکل $\{N\}$ را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$[B] = \{L\}\{N\}^T \quad (14)$$

$\{\delta P_e\}$ یک تغییر مجازی دلخواه در فشار گرهی است. چنانچه $\{\delta P_e\}$ مخالف صفر باشد در آن صورت معادله (۱۳) به معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$(15)$$

$$\frac{1}{C^2} \int_V \{N\}\{N\}^T dV \{\ddot{P}_e\} + \int_V [B]^T [B] dV \{P_e\} + \rho_0 \int_S \{N\}\{n\}^T \{N'\}^T dS \{U\} = \{0\}$$

معادله (۱۵) را به منظور بدست آوردن معادله گسسته سازی شده موج به فرم زیر می‌نویسیم:

$$[M_e^P] \{\ddot{P}_e\} + [K_e^P] \{P_e\} + \rho_0 [R_e]^T \{U\} = \{0\} \quad (16)$$

که در آن $[M_e^P] = \frac{1}{C^2} \int_V \{N\}\{N\}^T dV$ ماتریس جرم سیال

و $[K_e^P] = \int_V [B]^T [B] dV$ ماتریس سختی سیال

$\rho_0 [R_e]^T = \rho_0 \int_S \{N\}\{n\}^T \{N'\}^T dS$ ماتریس جرم همبسته

(وجه مشترک سیال - سازه) است.

چنانچه اتلاف انرژی ناشی از استهلاک در مرز سیال موجود باشد، در آن صورت معادله (۱۲) بشکل زیر است:

$$(17)$$

$$\int_V \delta P \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV - \int_V \delta P \{L\}^T (\{L\}P) dV + \int_S \delta P \left(\frac{r}{\rho_0 C} \right) \frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} dS = 0$$

r = مشخصه امیدانس مصالح در مرز می‌باشد. چنانچه فرض شود که تنها در سطح مرزی S اتلاف وجود دارد، بنابراین جمله اتلاف معادله (۱۷) روی سطح S انتگرال گیری می‌شود:

$$D = \int_S \delta P \left(\frac{r}{\rho_0 C} \right) \frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} dS \quad (18)$$

D = جمله اتلاف است. در قالب روابط اجزاء محدود خواهیم داشت:

$$D = \{\delta P_e\}^T \frac{\beta}{C} \int_S \{N\}\{N\}^T dS \{\dot{P}_e\} \quad (19)$$

$\beta = r/\rho_0 C$ ضریب مرز جذب می‌باشد. برای احتساب اتلاف

انرژی در سطح مرز جذب، جمله اتلاف بدست آمده از (۱۹) را بایستی به معادله (۱۳) اضافه نمود:

با توجه به (۵) و (۶) معادله (۷) را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \{L\}^T (\{L\}P) = 0 \quad (8)$$

ماتریسهای اجزاء را با گسسته سازی معادله (۸)، توسط روش گالرکین بدست می‌آوریم. با ضرب معادله (۸) در یک تغییر فشار مجازی و انتگرال گیری در سرتاسر حجم دامنه و با برخی تغییرات نتیجه می‌شود:

$$(9)$$

$$\int_V \frac{1}{C^2} \delta P \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV + \int_V (\{L\}^T \delta P) (\{L\}P) dV = \int_S \{n\}^T \delta P (\{L\}P) dS$$

V = حجم دامنه و δP = تغییر فشار مجازی و S = سطحی که مشتق فشار نرمال در آن اعمال می‌شود (مرز طبیعی) و $\{n\}$ = بردار واحد عمود بر سطح S می‌باشند.

در مساله اندرکنش سازه - سیال، سطح S عبارت است از وجه مشترک سیال و سازه. برای ساده سازی فرضیات انجام گرفته، معادلات ممتنم سیال رابطه زیر را بین گرادیان فشار سیال و شتاب نرمال سازه در وجه مشترک سیال و سازه نتیجه می‌دهد:

$$\{n\} \cdot \{\nabla P\} = -\rho_0 \{n\} \cdot \frac{\partial^2 \{U\}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$\{U\}$ = بردار تغییر مکان سازه در وجه مشترک سیال و سازه و ρ_0 = چگالی سیال می‌باشند.

معادله (۱۰) را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\{n\}^T (\{L\}P) = -\rho_0 \{n\}^T \left(\frac{\partial^2 \{U\}}{\partial t^2} \right) \quad (11)$$

پس از جایگذاری (۱۱) در (۹) می‌توان نوشت:

$$(12)$$

$$\int_V \frac{1}{C^2} \delta P \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV + \int_V (\{L\}^T \delta P) (\{L\}P) dV = - \int_S \rho_0 \delta P \{n\}^T \left(\frac{\partial^2 \{U\}}{\partial t^2} \right) dS$$

معادله (۱۲) شامل متغیرهای وابسته فشار سیال P و مولفه‌های تغییر مکان سازه می‌باشند. معادله (۱۲) در قالب روابط اجزاء محدود به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$(13)$$

$$\int_V \frac{1}{C^2} \{\delta P_e\}^T \{N\}\{N\}^T dV \{\ddot{P}_e\} + \int_V \{\delta P_e\}^T [B]^T [B] dV \{P_e\} +$$

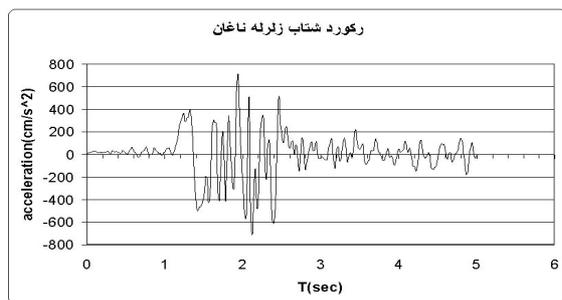
$$\int_S \rho_0 [\delta P_e]^T \{N\}\{n\}^T \{N'\}^T dS \{U\} = \{0\}$$

$\{N\}$ = تابع شکل المان برای فشار و $\{N'\}$ = تابع شکل اجزاء برای تغییر مکان و $\{P_e\}$ = بردار فشار گرهی و $\{U_e\}$ = بردار

که در آن $[M_e] = \rho_0 [R_e]^T$ و $[K_e] = -[R_e]$ می‌باشد. در یک مساله اندرکنش سازه - سیال، المان سیال آکوستیک تمام زیر ماتریسها با بالانویس P و همچنین زیر ماتریس $[R_e]$ و $\rho_0 [R_e]^T$ را ایجاد خواهند کرد، زیر ماتریسهایی که فاقد بالانویس هستند توسط المان سازه به کاربرده شده در مدل، تولید خواهند شد.

۳. پارامترهای ورودی و شرایط مرزی حاکم

در این مقاله توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه برای شرایط و شکل‌های مختلف به روش اویلر- لاگرانژ، انجام شده است. مدل‌های مورد مطالعه سه بعدی بوده و تحلیل‌های انجام شده در قلمرو زمان (تحلیل تاریخچه زمانی) می‌باشند. جهت تحریک افقی و قائم از رکورد زلزله ناغان (سال ۱۹۷۷) استفاده شده است (شکل ۱). شتاب مبنای طراحی برای نرمال کردن رکورد زلزله ناغان 0.3g می‌باشد. در مدل‌های تحلیل شده به دلیل تقارن در هندسه و شرایط بارگذاری دریچه از نصف دریچه استفاده شده است. پوسته دریچه دارای عرض 7.5 m (750 cm) و ارتفاع 1824 cm (1824 cm) می‌باشد.



شکل ۱. رکورد زلزله ناغان

شرایط تکیه‌گاهی دریچه (شرایط مرزی) به صورت زیر می‌باشد: در محل تقاطع بازوها درجات آزادی تغییر مکانی و درجات آزادی دورانی حول محور X و Z بسته می‌باشند. کلیه نقاطی که روی محور تقارن دریچه قرار دارند درجه آزادی تغییر مکان U_x و دورانی حول محور X و Z در آنها بسته می‌باشند. کلیه نقاطی که در قسمت پائین پوسته دریچه قرار دارند و محل قرارگیری دریچه بر سرریز هستند در جهت Z تغییر مکان آنها (U_z) بسته شده است. شرایط مرزی اعمال شده به محیط سیال عموماً به صورت زیر می‌باشد:

شرط مرزی S_1 : برای انتهای مخزن از شرط تابش استفاده استفاده شده است. برای اعمال شرط تابش در مرز قطع از

$$[C_e^P] \{\dot{P}_e\} = \frac{\beta}{C} \int_S \{N\} \{N\}^T dS \{\dot{P}_e\} \quad (20)$$

که در آن: $[C_e^P] = \frac{\beta}{C} \int_S \{N\} \{N\}^T dS$ ماتریس استهلاک سیال است.

بالاخره با ترکیب معادلات (۱۶) و (۲۰)، معادله جداسازی شده موج با احتساب اتلاف در وجه مشترک به صورت زیر است:

$$[M_e^P] \{\ddot{P}_e\} + [C_e^P] \{\dot{P}_e\} + [K_e^P] \{P_e\} + \rho_0 \{R_e\}^T \{\ddot{U}_e\} = 0 \quad (21)$$

معادله حاکم بر سازه را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$[M_e] \{\ddot{U}_e\} + [C_e] \{\dot{U}_e\} + [K_e] \{U_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{Pr}\} \quad (22)$$

بردار فشار سیال $\{F_e^{Pr}\}$ در وجه مشترک S با انتگرال گیری روی سطح مشترک بدست می‌آید:

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\} P \{n\} dS \quad (23)$$

که در آن: $\{N'\} =$ توابع شکل به کاربرده شده برای جداسازی مولفه‌های تغییر مکان w, v, u (از المان سازه بدست می‌آیند) و $\{n\} =$ بردار نرمال در مرز سیال می‌باشند. با جایگذاری تابع اجزاء محدود (۹) در (۲۳) می‌توان نوشت:

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\} \{N\}^T \{n\} dS \{P_e\} \quad (24)$$

با مقایسه انتگرال معادله (۲۴) با تعریف ماتریسی $\rho_0 [R_e]^T$ در معادله (۱۶) مشخص می‌شود که:

$$\{F_e^{Pr}\} = [R_e]^T \{P_e\} \quad (25)$$

که در آن: $[R_e]^T = \int_S \{N'\} \{N\}^T \{n\} dS$ می‌باشد. با جایگذاری (۲۵) در معادله (۲۲) معادله دینامیکی المان سازه به صورت زیر بدست می‌آید:

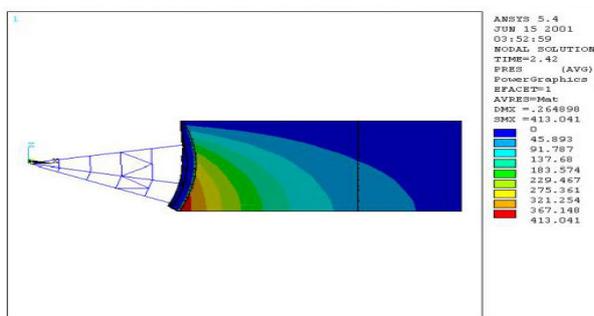
$$[M_e] \{\ddot{U}_e\} + [C_e] \{\dot{U}_e\} + [K_e] \{U_e\} - [R_e] \{P_e\} = \{F_e\} \quad (26)$$

معادلات (۲۱) و (۲۶) معادلات جداسازی اجزاء محدود کامل برای مساله اندرکنش سازه - سیال را توصیف می‌کنند و مجموعه دو معادله را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

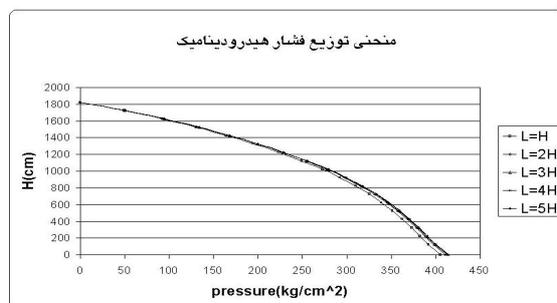
$$\begin{bmatrix} [M_e] & [0] \\ [M_e^P] & [M_e^P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_e\} \\ \{\dot{P}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_e] & [0] \\ [0] & [C_e^P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_e\} \\ \{\dot{P}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_e] & [K_e^P] \\ [0] & [K_e^P] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_e\} \\ \{P_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_e\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

مخزن (آب پشت دریچه) می باشد، تحلیل تاریخچه زمانی شده است. در این حالت فرض شده که آب پس از طی مسافت در درون یک کانال به دریچه می رسد و کانال دارای طول زیادی می باشد.

نتایج تحلیل های انجام شده نشان می دهد که با در نظر گرفتن $L=2H$ تحلیل تاریخچه زمانی همگرا شده و با افزایش طول مخزن تغییرات فشار ناچیز می شود. بنابراین می توان گفت که برای فرکانسهای کمتر از فرکانس مخزن می توان با در نظر گرفتن طولی برابر $L=2H$ برای مخزن (آب پشت دریچه) توزیع فشار هیدرودینامیک را بر روی دریچه محاسبه کرد. توزیع فشار برای مدل کوپل شده آب و دریچه برای طول $L=2H$ در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. خطوط تراز توزیع فشار هیدرودینامیک برای طول $L=2H$ (واحد توزیع فشار kg/cm^2 می باشد)

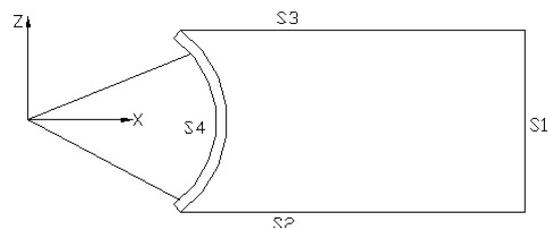


شکل ۴. منحنی های توزیع فشار وارد بر دریچه برای طولهای مختلف مخزن

برای مقایسه توزیع فشار بدست آمده بر روی پوسته دریچه برای طول $L=2H$ و بررسی صحت انجام تحلیل، توزیع فشار فوق با توزیع فشاری که از رابطه پیشنهادی وسترگارد و زنگار محاسبه می شود مقایسه شده است (شکل ۵).

نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی و فرمول وسترگارد بر یکدیگر منطبق نبوده و بین مقادیر فوق اختلاف وجود دارد. که این اختلاف برای فشار ماکزیمم وارد بر پوسته دریچه در

خاصیت جذب امواج توسط المان سیال استفاده شده است. بدین منظور در انتهای مخزن المانهای سیال با خاصیت جذب کامل را قرار می دهیم. در این صورت این المانها از انعکاس کامل امواج رسیده به مرز قطع جلوگیری خواهند نمود. شرط مرزی کف مخزن S_2 : کف مخزن صلب می باشد. شرط مرزی سطح آزاد مخزن S_3 : فشار گره های تمام المانهای سیالی که در سطح مخزن قرار دارند صفر می باشند. شرط مرزی سطح مشترک مخزن و دریچه S_4 : تعریف وجه مشترک دریچه و سیال و انتقال آن به مدل اجزا محدود شرط مرزی وجوه جانبی: وجوه جانبی همانند S_2 صلب می باشند.



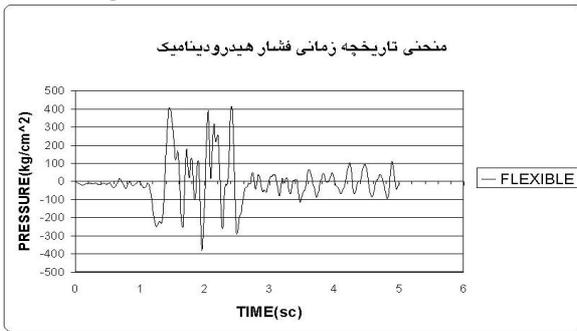
شکل ۲. مرزهای مختلف سیال در مدل اندرکنش آب و دریچه

خصوصیات مصالح مصرفی عبارتند از: چگالی فولاد $0.78E-2 \text{ kg/cm}^3$ ، مدول الاستیسیته فولاد $0.21E7 \text{ kg/cm}^2$ ، میرایی سازه 4%، سرعت صوت $0.14400E6 \text{ cm/s}$ و چگالی آب $0.1E-2 \text{ kg/cm}^3$ دردمای 5 درجه سانتیگراد می باشد.

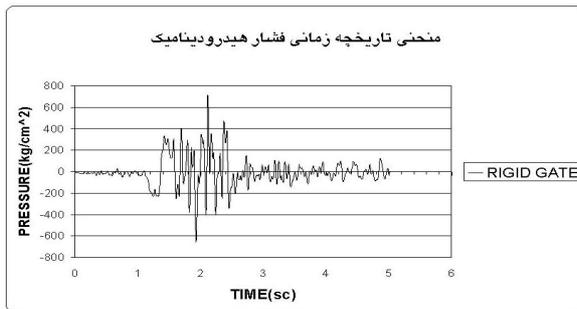
برای نشان دادن توزیع فشار هیدرودینامیک بیشینه وارد بر دریچه، ابتدا با استفاده از تاریخچه زمانی فشار نقاط واقع بر پوسته دریچه، زمانی را که فشار در آن نقاط بیشینه می شود را مشخص کرده و سپس توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر پوسته دریچه را در آن زمان نشان می دهیم. برای این منظور از منحنی تاریخچه زمانی گره 39 که در کف مخزن و روی محور تقارن دریچه قرار دارد استفاده می شود.

۴. بررسی طول موثر مخزن در اندرکنش آب و دریچه

جهت بررسی طول موثر مخزن، مدل همبسته (کوپل) شده آب و دریچه برای طولهای مختلف $L=H$ و $L=2H$ و $L=3H$ و $L=4H$ و $L=5H$ که در آن ارتفاع دریچه بوده و L طول



الف) - دریچه انعطاف پذیر

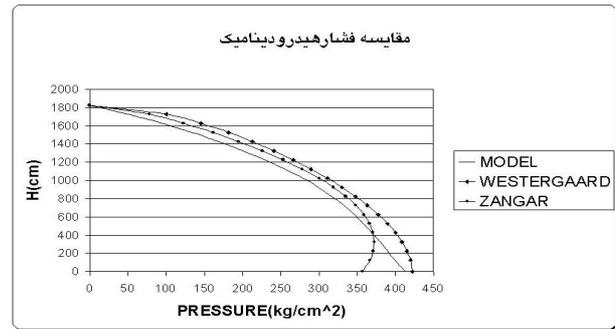


ب) - دریچه صلب

شکل ۶. منحنی تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه در ۳۹ روی محور تقارن دریچه

۶. تاثیر میرایی سازه در فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه

پدیده‌ای که باعث می‌شود ارتعاش یک سیستم به تدریج مستهلک گردد میرایی نامیده می‌شود. در بررسی‌های انجام شده میرایی سازه‌های فولادی بین 0.02 تا 0.05 و سازه‌های بتنی 0.03 تا 0.05 برآورد شده است. بنابراین دریچه نیز به عنوان یک سازه از این قاعده مستثنی نبوده و دارای میرایی خواهد بود که بزرگی این میرایی بر فشار هیدرودینامیک وارد بر پوسته دریچه موثر می‌باشد. جهت بررسی این مساله دریچه برای میرایی‌های 0%، 3%، 4% و 5% تحلیل شده است. نمودارهای مربوطه در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. از نمودارهای ترسیم شده اینگونه برداشت می‌شود که هر چه میرایی سازه کمتر باشد فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه بیشتر می‌شود. به طوری که برای میرایی 0% فشار هیدرودینامیک ماکزیمم نسبت به روش وسترگارد و زنگار به ترتیب 128% و 169% بیشتر شده است و با افزایش میرایی فشار هیدرودینامیک بطور موثری کاهش می‌یابد به عنوان مثال، برای میرایی 5% فشار هیدرودینامیک نسبت به روش وسترگارد 4% کمتر می‌شود. با افزایش میرایی دامنه حرکتها و ارتعاش دریچه کاهش و امواجی که در اثر شتاب اعمالی در

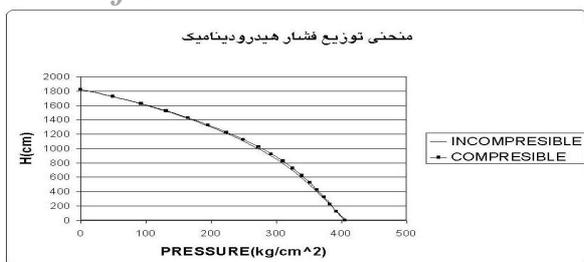


شکل ۵. مقایسه توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه با روش زنگار و وسترگارد برای نقاط واقع بر محور تقارن دریچه

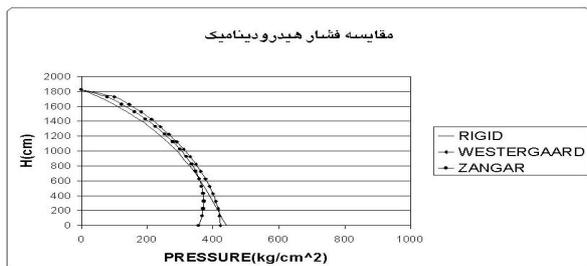
حدود 12% می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که با مدل کردن حجم آبی به طول $L=2H$ و با ارتفاع H در پشت دریچه، توزیع فشار هیدرودینامیکی که از فرمول وسترگارد محاسبه می‌شود از توزیع فشاری که با فرض انعطاف پذیری دریچه و وجود اندرکنش بین پوسته و آب با روشهای عددی (نرم افزار ANSYS) بر پوسته دریچه محاسبه می‌شود بیشتر است و این اختلاف برای روش زنگار کمتر می‌باشد. گرچه روش زنگار با فرض صلب بودن سازه و تراکم ناپذیری آب می‌باشد اما به نظر می‌رسد که نسبت به روش وسترگارد جواب بهتری را به ما می‌دهد و شاید بتوان علت این اختلاف را عدم تحلیلی بودن روش فوق و متکی بودن آن بر مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین فرض تراکم ناپذیری آب ذکر کرد.

۵. پاسخ فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه صلب

برای اینکه رفتار دریچه صلب باشد، مدول الاستیسیته اعمال شده برای دریچه مقدار بزرگی ($E = 0.21E13 \frac{kg}{cm^2}$) انتخاب شده است. منحنی‌های تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیک وارد بر گره 39 در دو حالت انعطاف پذیر و صلب در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. همانگونه که از شکل (۶) مشخص است حداکثر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه در حالت صلب نسبت به حالت انعطاف پذیر 72% بیشتر شده است. همچنین زمان رسیدن به فشار ماکزیمم در حالت صلب کمتر از حالت انعطاف پذیر می‌باشد چرا که در حالت صلب فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه و شتاب اعمال شده هم فاز می‌باشند و این زمان مساوی زمانی است که شتاب در رکورد موجود به حداکثر می‌رسد ($t = 2.11 \text{ sec}$).



شکل ۸. مقایسه توزیع فشار هیدرودینامیک نقاط واقع بر محور تقارن دریچه در دو حالت سیال تراکم پذیر و تراکم ناپذیر



شکل ۹. مقایسه توزیع فشار هیدرودینامیک برای نقاط روی محور تقارن دریچه صلب و سیال تراکم ناپذیر با روش زنگار و وسترگارد

تراکم ناپذیری سیال تاثیر زیادی بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه ندارد و می‌توان از تراکم پذیری سیال صرف نظر نمود اما برای حالت صلب، صرف نظر کردن از تراکم پذیری خطای زیادی در محاسبات ایجاد می‌کند.

۸. تاثیر شکل مخزن بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه

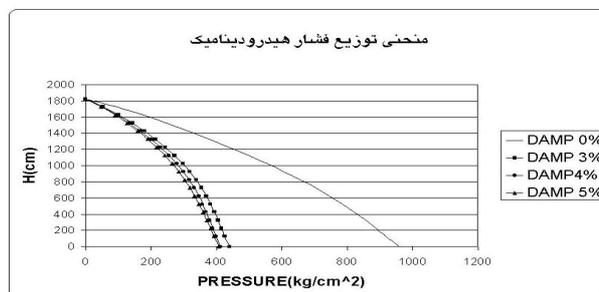
محل قرارگیری دریچه بر روی بدنه سد و یا در مجاورت سد می‌باشد. بنابراین بسته به موقعیت قرارگیری دریچه، مخزن می‌تواند به شکل‌های مختلفی باشد. از طرفی فرکانس مخزن به شکل مخزن بستگی دارد، که این فرکانس در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه موثر می‌باشد. در بررسی‌های قبلی فرض شده بود که آب پس از طی یک مسافت درون یک کانال مستقیم به دریچه می‌رسد و با این فرض تنها عامل موثر در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه، ارتعاش دریچه و در نهایت اندرکنش بین آب درون کانال (عمق آب برابر ارتفاع دریچه است) و پوسته دریچه می‌باشد. اما هنگامی که فرض فوق برقرار نبوده و عمق آب پس از طی یک مسافت کوتاه افزایش یابد و یا اینکه عرض کانال در پلان تغییر نماید و ...

سازه منتشر شده به سرعت مستهلک می‌شود و در واقع با کاهش دامنه حرکت دریچه به واسطه ارتعاشات ایجاد شده، تاثیر دریچه بر روی مخزن کمتر و در نتیجه فشار هیدرودینامیک بر دریچه کاهش می‌یابد. بنابراین به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان گفت که میرایی سازه تاثیر زیادی بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه دارد.

۷. تاثیر تراکم ناپذیری سیال بر فشار هیدرودینامیک

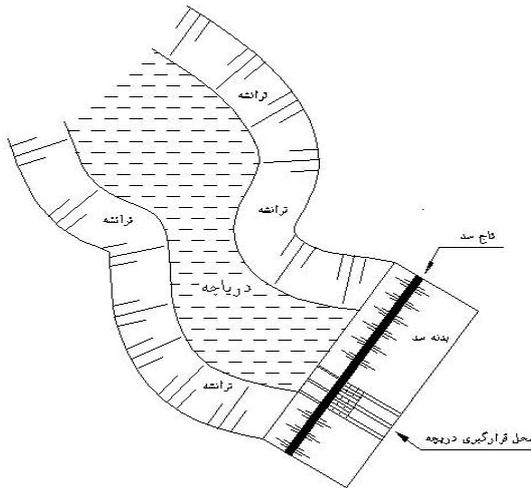
در مسائل تحلیلی چنانچه سیال تراکم ناپذیر فرض شود حل مساله اندرکنش تا حدود زیاد ساده می‌گردد چرا که در این حالت، معادله حاکم بر مساله اندرکنش معادله لاپلاس می‌باشد که حل این معادله به مراتب ساده تر از معادله هلمهولتز می‌باشد. از جمله روشهای تحلیلی می‌توان به روش زنگار اشاره کرد.

برای فرض تراکم ناپذیری سیال، می‌بایست سرعت صوت در سیال را عددی بسیار بزرگ فرض نماییم (مثلاً $0.1e11 \text{ cm/sec}$). نمودارهای حاصل از توزیع فشار با فرض المان تراکم پذیر، تراکم ناپذیر در شکل (۸) ترسیم شده‌اند. شکل (۸) نشان می‌دهد اختلاف فشار هیدرودینامیک برای دو حالت تراکم پذیر و تراکم ناپذیر ناچیز می‌باشد.



شکل ۷. منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیک نقاط واقع بر محور تقارن دریچه (در $Y=750 \text{ cm}$) برای میرایی‌های مختلف در سازه

جهت بررسی تاثیر تراکم ناپذیری در حالت صلب، نمودارهای توزیع فشار را در شکل (۹) نشان داده‌ایم. از شکل (۹) اینگونه برداشت می‌شود که فرض تراکم ناپذیری تاثیر زیادی بر فشار هیدرودینامیک در حالت صلب دارد. در این حالت فشار بدست آمده اختلاف کمی نسبت به روش زنگار و وسترگارد دارد. بنابراین با فرض انعطاف پذیر بودن دریچه، تراکم پذیری یا



شکل ۱۰. شکل دریاچه

در اثر ارتعاش دیواره نیز امواج فشار هیدرودینامیکی در مخزن منتشر می شود. خطوط تراز و نمودارهای توزیع فشار در شکل های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده اند. همانگونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است افزایش عرض مخزن به فاصله H از دریچه سبب افزایش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه می شود. چرا که در این حالت علاوه بر ارتعاش دریچه دیواره کانال نیز مرتعش شده و سبب انتشار امواج فشار هیدرودینامیکی در درون مخزن می شود و در نتیجه تداخل این امواج با امواج منتشر شده از دریچه، فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه افزایش می یابد. لازم به ذکر است که میزان افزایش فشار هیدرودینامیکی به فاصله محل افزایش عرض تا دریچه بستگی دارد. در حالت فوق این فاصله برابر H می باشد.

۱۰. بررسی تاثیر افزایش عمق و فاصله محل افزایش

عمق از دریچه

در بخش های قبلی مدل های مورد مطالعه دارای عمقی به ارتفاع دریچه بودند و در تمامی مدل های مورد مطالعه، جهت مقایسه جواب های حاصل شده از تئوری و سترگارد و زنگار استفاده شده است. نکته حائز اهمیت در این مورد استفاده از ارتفاع مناسب در فرمول و سترگارد و زنگار برای توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه می باشد.

هنگامی که آب درون یک کانال با طول زیاد با دریچه مدل گردد، ارتفاع مناسب برای استفاده از فرمول و سترگارد و زنگار ارتفاع دریچه می باشد چرا که در این حالت H در تمام طول کانال ثابت می باشد. اما هنگامی که بعد از طی مسافتی، عمق آب افزایش یابد دیگر نمی توان از ارتفاع دریچه استفاده کرد.

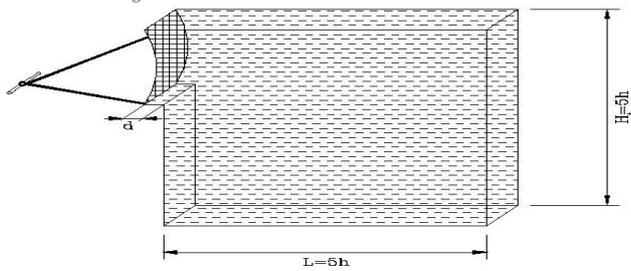
در اینصورت ارتعاش سد و یا دیواره سرریز بر توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه تاثیر خواهد داشت.

برای توضیح بیشتر در این مورد نمای کلی از شکل دریاچه، سد، و موقعیت قرارگیری دریچه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. معمولا طول مخزن در جهت نرمال بر سطح اندرکنش زیاد نبوده و پس از مسافتی مسیر جریان و شکل مخزن تغییر می نماید. تغییر مسیر جریان و نهایتا عوض شدن شکل مخزن در انعکاس امواج فشاری به داخل مخزن می تواند نقش زیادی داشته باشد و در این حالت سبب افزایش فشار هیدرودینامیک وارد بر سد و دریچه شود از طرف دیگر با توجه به اینکه در هنگام زلزله مولفه شتاب به صورت رفت و برگشتی عمل می کند و در این حالت ارتعاش دیواره (بدنه) دره می تواند سبب انتشار امواج فشاری در محیط مخزن شود که این مساله نیز در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه می تواند موثر باشد. بنابراین هرچه طول مخزن در جهت عمود بر سطح اندرکنش بیشتر باشد تاثیر انعکاس امواج برگشتی یا امواج منتشر شده در اثر ارتعاش دیواره دره بر دریچه و سد کمتر خواهد شد. بنابراین شکل مخزن می تواند تاثیر زیادی در فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه در هنگام زلزله داشته باشد. البته به این مساله نیز باید توجه شود که افزایش طول مخزن در جهت عمود بر سطح اندرکنش اگرچه سبب کاهش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه در هنگام زلزله می شود اما از طرف دیگر با افزایش این طول، نیروهای امواج سطحی در اثر باد افزایش می یابند که این نیروها در مخازن کم عمق حائز اهمیت می باشند. پس به طور کلی پارامترهای زیادی در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه موثر می باشند. با توجه به اینکه امکان بررسی تمام این مسائل در این مقاله وجود ندارد، لذا با فرض اینکه مخزن در امتداد عمود بر سطح اندرکنش به صورت مستقیم باقی می ماند به بررسی تاثیر افزایش عرض مخزن بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه و همچنین تاثیر افزایش عمق و انتخاب H مناسب جهت استفاده در فرمول و سترگارد پرداخته می شود.

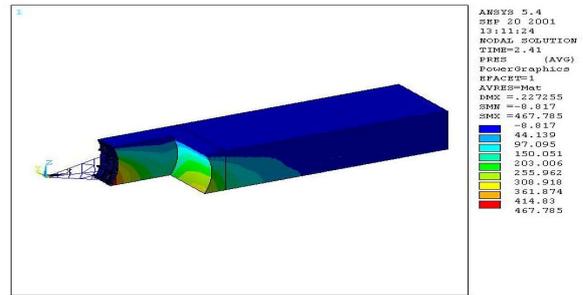
۹. تاثیر تغییرات پلان در فشار هیدرودینامیک

وارد بر دریچه

برای نشان دادن تغییرات پلان و بررسی تاثیر افزایش عرض، به فاصله H از دریچه، عرض مخزن را به اندازه H افزایش داده و مدل بدست آمده را مورد بررسی قرار دادیم. در این حالت فرض شده که سطح اندرکنش تنها بین آب و دریچه نبوده و

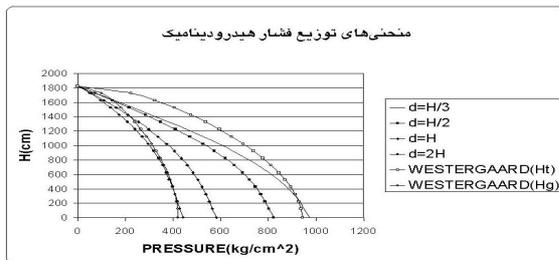


شکل ۱۳. مدل آب و دریچه

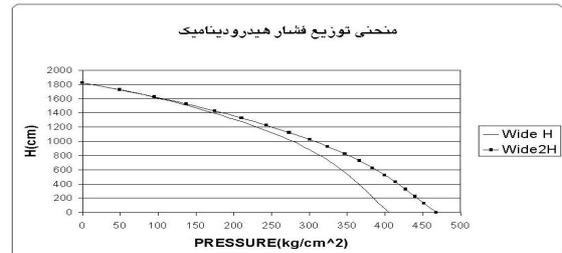


شکل ۱۱. خطوط تراز توزیع فشار هیدرودینامیک در

مخزن (واحد توزیع فشار kg/cm^2 می‌باشد)

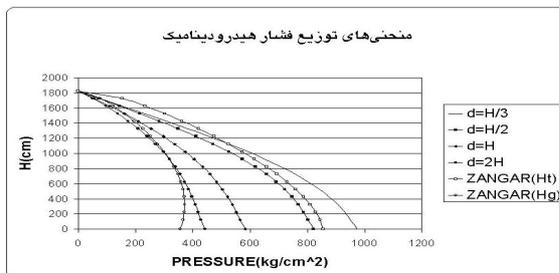


(الف)



شکل ۱۲. منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیک نقاط روی

محور تقارن دریچه برای مخزنی به عرض H و $2H$



(ب)

شکل ۱۴. منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیک نقاط

روی محور تقارن دریچه و مقایسه با روش

(الف) - وسترگارد (ب) - زنگار (H_t = عمق کل مخزن

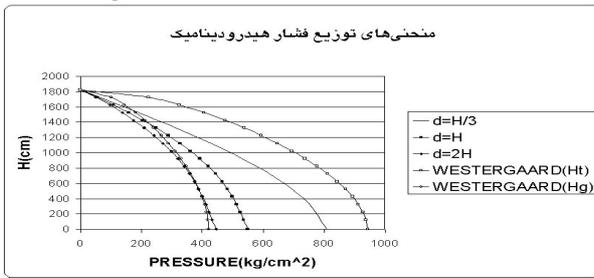
و H_g = ارتفاع دریچه می‌باشند).

انتخاب یک ارتفاع برای استفاده در فرمول وسترگارد یا زنگار در تمامی حالتها مشکل می‌باشد. چرا که توزیع فشار وارد بر دریچه با افزایش یا کاهش d در این بازه تغییر می‌نماید. در چنین حالتی می‌توان به دو روش اقدام نمود. حالت اول آنکه از عمق کل استفاده کنیم که چنین حالتی گرچه در جهت اطمینان می‌باشد، اما در نهایت دریچه طرح شده غیر اقتصادی خواهد بود. روش دوم اینکه بر اساس فاصله d بازه‌هایی را تعریف کنیم و برای هر کدام از این بازه‌ها کسری از عمق کل آب را در فرمول وسترگارد یا زنگار استفاده نماییم. که ارائه چنین بازه‌هایی مستلزم اجراهای متعدد با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی همچون ارتفاعهای مختلف برای دریچه، عمقهای مختلف و مقادیر مختلف d می‌باشد. که تقریباً غیر ممکن می‌باشد. لذا توصیه می‌شود که برای هر مساله

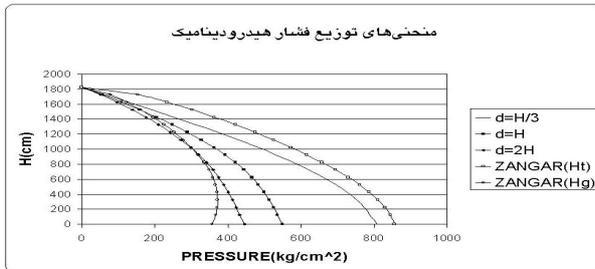
گرچه عموماً در جهت اطمینان از ارتفاع کل (عمق آب جلوی دریچه) در این مورد استفاده می‌شود. اما در واقع کسری از این ارتفاع در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه موثر می‌باشد. برای بررسی این مساله مخزنی به طول $L=5H$ و با عمق $5H$ مورد بررسی قرار گرفت شکل (۱۳).

تاثیر فاصله محل افزایش عمق از دریچه بر فشار هیدرودینامیک برای $d=H/9$ و $d=H/2$ و $d=H$ و $d=2H$ (H ارتفاع دریچه می‌باشد) مورد بررسی قرار گرفت. در این حالتها فرض شده که تنها در انتهای مخزن جذب امواج فشاری وجود دارد و سایر وجوه مخزن صلب می‌باشند. نمودارهای توزیع فشار وارد بر پوسته دریچه در شکل (۱۴) نشان داده شده‌اند. از روی نمودارهای توزیع فشار می‌توان پی برد که افزایش عمق سبب افزایش فشار خواهد شد و هر چه فاصله محل افزایش عمق از دریچه کمتر باشد این میزان افزایش بیشتر خواهد شد.

نمودارهای توزیع فشار نشان می‌دهند که هر چه فاصله محل افزایش عمق بیشتر شود، مقدار فشار روی دریچه کاهش می‌یابد. حال این نکته وجود دارد که در فرمول وسترگارد یا زنگار از چه ارتفاعی استفاده کنیم. تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که اگر فاصله $d > 2H$ باشد می‌توان در رابطه وسترگارد از ارتفاع دریچه استفاده نمود اما برای $d < 2H$



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیک نقاط روی محور تقارن دریاچه و مقایسه آنها با (الف) - روش وسترگارد (ب) - روش زنگار (H_t) = عمق کل آب در مخزن و H_g = ارتفاع دریاچه می‌باشند).

۱۳. نتیجه‌گیری

از مجموعه تحلیل‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- برای فرکانسهای کمتر از فرکانس مخزن با در نظر گرفتن $L=2H$ (ارتفاع دریاچه) می‌توان توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه را محاسبه نمود.
- ۲- برای طولهای بیشتر از $L=2H$ (ارتفاع دریاچه) در فرکانسهای کمتر از فرکانس مخزن، شرط مرزی انتها تاثیر کمی در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه دارد.
- ۳- با فرض انعطاف‌پذیری دریاچه، در حالتی که آب پس از طی مسافت در درون یک کانال به دریاچه می‌رسد، توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه با توزیع فشار بدست آمده از روش وسترگارد و زنگار اختلاف چندانی ندارد. به عبارتی دیگر در این حالت استفاده از روش وسترگارد و زنگار در جهت اطمینان می‌باشد.
- ۴- صلبیت باعث افزایش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه می‌شود. در این حالت توزیع فشار بدست آمده نسبت به روش وسترگارد و زنگار بیشتر است.
- ۵- میرائی سازه پارامتر مهمی در توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه می‌باشد به گونه‌ای که با کاهش میرائی سازه فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه کاهش می‌یابد.
- ۶- فرض تراکم‌پذیری یا تراکم‌ناپذیری سیال تاثیر چندانی بر دریاچه انعطاف‌پذیر ندارد. اما در حالت صلب تاثیر تراکم‌ناپذیری

خاص از طریق آنالیز عددی توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه محاسبه و مبنای طراحی قرار گیرد.

۱۱. تاثیر جذب انرژی در کف مخزن بر فشار

وارد بر دریاچه

وجود رسوبات و مواد نرم در کف دریاچه، بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه تاثیر دارد. برای نشان دادن تاثیر جذب امواج در توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر دریاچه مدل‌های مورد مطالعه در بخش قبل با فرض جذب امواج در کف مخزن تحلیل شده است. در این حالت فرض شده که ۳۰٪ انرژی امواج در اثر برخورد با کف مخزن جذب می‌شود. نمودارهای توزیع فشار برای این حالت در شکل (۱۵) نشان داده شده‌اند. نمودارهای توزیع فشار نشان می‌دهند که جذب انرژی در کف مخزن سبب کاهش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه می‌شود. همچنین هرچه فاصله محل افزایش عمق تا دریاچه بیشتر باشد شرط مرزی کف مخزن تاثیر کمتری بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه دارد بنابراین با توجه به تحلیل‌های انجام شده می‌توان پیش‌بینی نمود که برای فواصل بیشتر از $2H$ ($d > 2H$) جذب امواج در کف مخزن تاثیری بر فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه ندارد. همچنین در حالتی که از عمق کل آب (H_t) در فرمول وسترگارد و زنگار استفاده شود اختلاف فشار بدست آمده با تئوری وسترگارد و زنگار زیاد می‌باشد و در این حالت می‌توان گفت که روش زنگار نسبت به روش وسترگارد جواب بهتری می‌دهد. اما در حالتی که از H_g استفاده شود تنها برای فاصله $d=2H$ جواب بدست آمده از فرمول وسترگارد و زنگار مناسب می‌باشد و برای سایر موارد ($d < 2H$) روش وسترگارد و زنگار در جهت خلاف اطمینان می‌باشد.

۱۲. تاثیر شیب دیواره مخزن بر فشار هیدرودینامیک

در مدل‌های بررسی شده، دیواره‌های مخزن قائم بوده و افزایش عمق به صورت آبی در نظر گرفته شد. اما با توجه به آنکه عموماً افزایش عمق به صورت تدریجی می‌باشد، جهت بررسی این مساله، در فاصله $d=H/3$ ، تغییرات عمق را با شیب ۴۵ درجه اعمال کردیم که نتایج حاصله با شیب ۰ و ۹۰ (نسبت به حالت قائم) مقایسه شده است. در این بررسی فرض شده که تنها در انتهای مخزن جذب انرژی وجود دارد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که افزایش شیب (نسبت به امتداد قائم) سبب کاهش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریاچه می‌شود.

[2] Kotsubo S., "Dynamic Water Pressure on Dams During Earthquakes" PROC. 2 ND. World Conf. Earthquake Eng 1960.

[3] Chopra A. K., "Earthquake Behavior Of Reservoir Systems", Proc ASCE, December 1968.

[4] Zienkiewicz O. C., "Hydrodynamics Pressure Due To Earthquake", Water Power, September 1964.

[5] "ANSYS Theory Reference", Chapter 8, Acoustics And Commands Manual.

[6] Xue, M., Xu, H., Liu, Y., Yue, D. K. P., "Computations of fully nonlinear three-dimensional wave-wave and wave-body interactions". Part 1. "Dynamics of steep three-dimensional waves". J. Fluid Mech. 438, 11, 39. 2001.

[7] Molin, B., Remy, F., Kimmoun, O., "Experimental study of the nonlinear wave interaction with a vertical plate". In: Proc. Int. Society of O-shore and Polar Engineering Conf. Toulon, France. 2004a.

[8] Molin, B., Remy, F., Kimmoun, O., Ferrant, P., "Third-order interactions and wave run-up". In: Proc. 18th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Le Croisic, France. 2003.

[9] Hammack, J. L., Henderson, D. M., "Experiments on deep-water waves with two-dimensional surface patterns". J. O-shore Mech. Arctic Eng. 125, 48, 53. 2003.

[10] Jamois, E., Kimmoun, O., Molin, B., Stassen, Y., "Nonlinear interactions and wave run-up near a GBS". In: Proc. 29th Int. Conf. Coastal Engineering (This conference). Lisbon, Portugal. 2004.

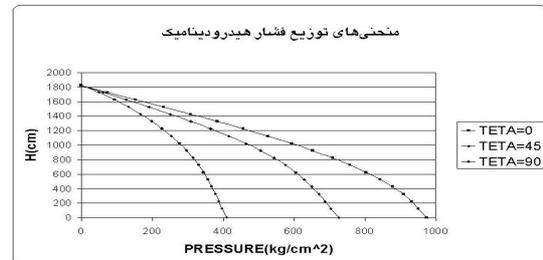
[11] Molin B., Remy F., Kimmoun O. & Jamois E. "The role of tertiary wave interactions in wave body problems", J. Fluid Mech., 528, 323-354. 2005

[12] Molin, B., Remy, F., Kimmoun, O., "Experimental study of the nonlinear wave interaction with a vertical plate". In: Proc. Int. Society of O-shore and Polar Engineering Conf. Toulon, France. 2004a.

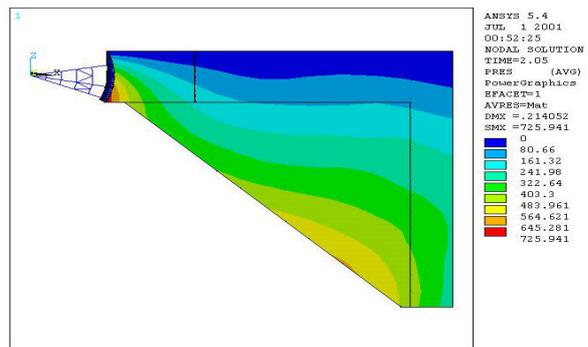
سیال اهمیت دارد چرا که در این حالت فرض تراکم ناپذیری باعث کاهش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه می‌شود.

۷- افزایش عرض مخزن باعث افزایش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه می‌شود.

۸- افزایش عمق سبب افزایش فشار هیدرودینامیک وارد بر دریچه می‌شود.



شکل ۱۶. منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیک نقاط روی محور تقارن دریچه برای شیب‌های مختلف نسبت به امتداد قائم



شکل ۱۷. کنتورهای توزیع فشار هیدرودینامیک در مخزن برای $TETA=45$ نسبت به امتداد قائم (واحد توزیع فشار kg/cm^2 می‌باشد)

مراجع

[1] Westergard H. M., "Water Pressure on Dams During Earthquakes", ASCE, Paper No. 1835, 1933.