

آنالیز عددی تأثیر آب‌بند بر اندرکنش موج سیال-سازه (WSI) با استفاده از روش‌های ALE و SPH

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، arahmatialaei@tvu.ac.ir

احمد رحمتی علائی*

چکیده

در این پژوهش، یک مدل عددی سه‌بعدی برای تحلیل اندرکنش موج سیال-سازه (WSI) در سناریوی شکست سد با حضور مانع ساحلی و آب‌بند ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده هم‌زمان از دو روش محاسباتی لاگرانژ-اویلر انتخابی (ALE) و هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) در نرم‌افزار غیرخطی LS-DYNA انجام شده و نتایج با مقایسه تاریخیچه زمانی نیروی وارد بر مانع صلب با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده‌اند. روش SPH به دلیل ماهیت بدون شبکه و توانایی بهتر در شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ، شکست ناگهانی موج، تطابق فیزیکی و عددی دقیق‌تری نسبت به روش ALE ارائه می‌دهد. در ادامه، اثر پارامترهای هندسی آب‌بند شامل ارتفاع، فاصله از مانع، شکل سطح مقطع و ابعاد طولی و عرضی آن به‌صورت جامع بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش ارتفاع آب‌بند با $F_{max}=V/\Delta N$ در مقایسه با کاهش فاصله طولی با $F_{max}=13/4N$ نقش مؤثرتری در کاهش نیروی برخورد موج دارد. همچنین، مقطع دایره‌ای با $27/1N$ بیشترین و مقطع نیم‌دایره‌ای پشت به مانع با $9/4N$ کمترین نیرو را ایجاد می‌کند. افزایش بعد طولی آب‌بند موجب کاهش 28% و افزایش بعد عرضی آن موجب کاهش 33% نیروی سیال می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز عددی، آب‌بند، اندرکنش موج سیال-سازه، لاگرانژ-اویلر انتخابی، هیدرودینامیک ذرات هموار، کد LS-DYNA.

Numerical Analysis of the Effect of a Dike on Wave-Structure Interaction (WSI) in Dam Break Phenomena Using ALE and SPH Methods

A. Rahmati Alaei

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

In this study, a three-dimensional numerical model is developed to analyze fluid-structure interaction under a dam-break scenario involving a coastal obstacle and a protective breakwater. Simulations are conducted using a coupled application of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Smoothed Particle Hydrodynamics methods within the nonlinear LS-DYNA framework, and the results are validated through comparison of the time histories of hydrodynamic forces acting on the rigid obstacle with experimental data. Owing to its mesh-free formulation and enhanced capability in capturing large deformations and sudden wave breaking, the SPH method demonstrates more accurate physical and numerical predictions than the ALE approach. A comprehensive parametric investigation is then performed to evaluate the influence of breakwater geometry, including height, distance from the obstacle, cross-sectional shape, and longitudinal and transverse dimensions. The results show that increasing the breakwater height reduces the peak impact force to 7.5 N, which is more effective than reducing the longitudinal distance, yielding a peak force of 13.4 N. Furthermore, the circular cross-section produces the maximum force of 27.1 N, whereas a rear-facing semicircular section results in the minimum force of 9.4 N.

Keywords: Numerical analysis, Dike, Wave-structure interaction, Arbitrary lagrangian-eulerian, Smoothed particle hydrodynamics, LS-DYNA code.

چشمگیری در دینامیک سیالات محاسباتی^۴ (CFD) ایجاد کرده‌اند.

روش SPH با رویکرد لاگرانژی و استفاده از تقریب‌های ذره‌ای مبتنی بر توابع کرنل^۵، معادلات دیفرانسیل حاکم بر دینامیک سیالات را حل می‌کند [۷]. برخلاف روش‌های مبتنی بر شبکه، این روش در شبیه‌سازی جریان‌های با هندسه‌های پیچیده، سطوح آزاد و تغییرشکل‌های شدید عملکرد مطلوب‌تری دارد. از ویژگی‌های برجسته SPH می‌توان به توانایی مدل‌سازی جابه‌جایی‌های بزرگ بدون نیاز به شبکه‌بندی انطباقی، رفع چالش‌های رهگیری سطح آزاد و پایداری عددی مناسب اشاره کرد [۸]. با این حال، اعمال شرایط مرزی غیر

۱- مقدمه

پدیده شکست سد یکی از مخاطرات مهم هیدرودینامیکی است که می‌تواند پیامدهای فاجعه‌باری از نظر تلفات انسانی، خسارات اقتصادی و تخریب زیرساخت‌ها به همراه داشته باشد [۱]. در این راستا، روش‌های محاسباتی پیشرفته نظیر روش لاگرانژ-اویلر انتخابی (ALE) و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) به‌عنوان ابزارهای نوین برای شبیه‌سازی اندرکنش موج سیال-سازه^۳ (WSI) مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۲-۶]. این روش‌ها با قابلیت مدل‌سازی دقیق پدیده‌های پیچیده نظیر شکست سد و امواج ساحلی، تحول

⁴ Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁵ Kernel

¹ Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

² Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

³ Wave-Structure Interaction (WSI)

لغزشی، جلوگیری از نفوذ ذرات و زمان محاسبات در مسائل سه‌بعدی و مقیاس واقعی همچنان از چالش‌های این روش محسوب می‌شوند. با وجود این محدودیت‌ها، دقت بالای SPH آن را به ابزاری کارآمد در تحلیل‌های CFD تبدیل کرده است [۹].

ژو همکاران [۱۰] جریان ناشی از شکست سد را به صورت سه‌بعدی با استفاده از روش SPH شبیه‌سازی کرده‌اند. هدف اصلی آن‌ها، ارزیابی کارایی موانع با هندسه‌های متفاوت به منظور طراحی بهینه و کاهش اثرات مخرب سیلاب ناشی از شکست سد بوده است. همچنین ژنگ و همکاران [۱۱] نشان دادند که روش SPH توانایی بالایی در مدل‌سازی جریان دوفازی در پدیده شکست سد دارد و می‌تواند رفتار پیچیده جریان‌های گذرا را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی کند. نتایج عددی این مطالعات همخوانی مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و کارایی این روش برای آنالیز جریان شکست سد و اثرات آن بر سازه‌ها تأیید شده است.

روش ALE با بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای دیدگاه‌های لاگرانژی و اویلری، امکان تحلیل دقیق مسائل سیالاتی همراه با جابه‌جایی‌های بزرگ را فراهم می‌کند [۱۲، ۱۳]. در این روش، حرکت شبکه می‌تواند در سه حالت همراه با ماده، ثابت در فضا یا با جابه‌جایی کنترل‌شده تعریف شود. پیشرفت‌های اخیر در ترکیب روش ALE با روش‌های ذره‌ای نظیر SPH، دقت شبیه‌سازی مسائل دارای مرزهای متحرک و تغییرشکل‌های بزرگ را به طور قابل توجهی افزایش داده است [۱۴-۱۶]. کارینگتون و همکاران [۱۷] یک روش سه‌بعدی مبتنی بر ALE را برای شبیه‌سازی جریان سیال در دامنه‌هایی با مرزهای متحرک توسعه داده‌اند. این روش از شبکه‌ای ثابت استفاده می‌کند که به صورت موضعی در نزدیکی مرزهای متحرک سازگار شده و پس از عبور مرز، به حالت اولیه بازمی‌گردد. این ویژگی نیاز به بازسازی مکرر شبکه را حذف کرده و دقت اعمال شرایط مرزی را در مرزهای متحرک افزایش می‌دهد. همچنین ژنگ و همکاران [۱۸] یک روش محاسباتی ترکیبی ارائه کرده‌اند که در آن روش مرز جاسازی شده با روش ALE برای شبیه‌سازی جریان‌های چند ماده‌ای ترکیب شده است. این رویکرد با بهره‌گیری از روش المان محدود تثبیت شده چندمقیاسی، امکان حل دقیق شرایط انتقال در مرزهای بین‌ماده‌ای را فراهم می‌کند.

در کنار مطالعات عددی، پژوهش‌های آزمایشگاهی متعددی نیز به بررسی پدیده شکست سد پرداخته‌اند. در این مطالعات، با استفاده از مدل‌های فیزیکی در مقیاس کوچک آزمایشگاهی، اثرات نیروی هیدرودینامیکی جریان ناشی از شکست سد بر سازه‌های ثابت و متحرک، از جمله آب‌بندها، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۹، ۲۰]. روش‌های آزمایشگاهی معمولاً شامل ایجاد ستون آب در مخازن مصنوعی و آزادسازی ناگهانی آن برای شبیه‌سازی جریان شکست سد است. در این آزمایش‌ها، پارامترهایی نظیر فشار، ارتفاع موج و نیروی وارد بر سازه‌ها اندازه‌گیری می‌شود تا اطلاعات دقیقی از اندرکنش پیچیده سیال و سازه به دست آید [۲۱، ۲۲]. این داده‌ها نقش مهمی در اعتبارسنجی و بهبود مدل‌های عددی دارند.

ترکیب مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در شبیه‌سازی WSI از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گومز و همکاران [۲۳] کد عددی SPHysics را بر اساس مجموعه‌ای از آزمایش‌ها جریان‌های سطح آزاد توسعه دادند.

پژوهش حاضر با هدف توسعه مدل‌های عددی برای آنالیز WSI در نرم‌افزار غیرخطی المان محدود^۱ LS-DYNA انجام شده است. این نرم‌افزار با یکپارچه‌سازی روش‌های عددی موجود امکان شبیه‌سازی جامع پدیده‌های هیدرودینامیکی را فراهم می‌کند. برخلاف سایر کدهای عددی موجود نظیر DualSPHysics [۲۴] که عمدتاً بر روش SPH تمرکز دارند، مدل عددی ارائه شده در این پژوهش با بهره‌گیری از کوپل چندفازی، محدودیت‌های مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده WSI را کاهش داده است. نوآوری اصلی این پژوهش ارائه یک چارچوب عددی سه‌بعدی یکپارچه مبتنی بر دو روش ALE و SPH برای تحلیل اندرکنش موج سیال-سازه در سناریوی شکست سد با حضور آب‌بند ساحلی است. در این چارچوب، عملکرد رویکردهای شبکه‌محور و بدون شبکه مقایسه شده و اثر پارامترهای هندسی آب‌بند شامل ارتفاع، فاصله از مانع و شکل سطح مقطع آن بر نیروهای هیدرودینامیکی ارزیابی شده است.

مدل‌های سه‌بعدی توسعه داده شده با کاهش قابل توجه زمان محاسبات می‌تواند نیروهای هیدرودینامیکی را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با دقت مطلوب پیش‌بینی نماید و مبنای طراحی بهینه آب‌بندها در پروژه‌های ساحلی و سدسازی قرار گیرد. بنابراین به طور مؤثر در کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی نقش آفرین خواهد بود.

۲- روش‌های محاسباتی

۲-۱- لاگرانژ-اویلر انتخابی (ALE)

روش ALE یک رویکرد محاسباتی در آنالیز عددی مبتنی بر FEM است. در این روش، شبکه المان‌ها نه به صورت ثابت در فضا (رویکرد اویلری) و نه به طور کامل متصل به ماده (رویکرد لاگرانژی) حرکت می‌کند، بلکه شبکه و ماده دارای حرکت نسبی نسبت به یکدیگر هستند. این ویژگی، روش ALE را به ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی مسائلی نظیر اندرکنش موج سیال-سازه تبدیل می‌کند که در آن‌ها تغییرشکل‌های بزرگ و موضعی در ماده رخ می‌دهد. در این روش، اثرات انتقالی ناشی از حرکت نسبی بین شبکه و ماده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + w_i \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial x_i} \quad (1)$$

در معادله فوق X_i مختصات لاگرانژی، x_i مختصات اویلری و $w_i = v_i - \dot{\theta}_i$ سرعت نسبی بین ماده و شبکه است.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هنگامی که سرعت ماده (v_i) و سرعت شبکه ($\dot{\theta}_i$) برابر باشند، شبکه و ماده به صورت یکپارچه حرکت کرده و رویکرد لاگرانژی حاصل می‌شود. در حالتی که شبکه ثابت باشد ($\dot{\theta}_i = 0$) روش اویلری شکل می‌گیرد. اگر شبکه با سرعتی متفاوت از ماده حرکت کند ($v_i \neq \dot{\theta}_i$) روش ALE به کار گرفته می‌شود. معادلات بقای حاکم بر ALE به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2)$$

¹ Finite Element

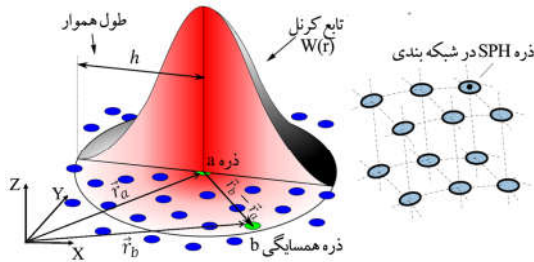
$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

b_i و $\sigma_{ij,j}$ به ترتیب نشان‌دهنده تانسور تنش کوشی و بردار نیروی حجمی هستند.

h طول هموارسازی (یا شعاع هسته) است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تقریب $A(r)$ برای ذره "a" در فرم گسسته به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A(\mathbf{r}_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a, h) \quad (5)$$

m_b و ρ_b به ترتیب نشان‌دهنده جرم و چگالی ذره "b" است.



شکل ۲- تقریب روش SPH برای ذره

تابع هسته در روش SPH باید شرایط اساسی از جمله مثبت بودن و نرمال‌سازی را برآورده کند. همچنین این تابع باید با افزایش فاصله از ذره به‌صورت یکنواخت کاهش یابد و در حالتی که طول هموارسازی به صفر میل کند، رفتاری مشابه تابع دلتا δ داشته باشد. یکی از توابع هسته پرکاربرد، تابع اسپلاین مکعبی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W(\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a, h) = \frac{1}{\pi h^3} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & \text{if } 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & \text{if } 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & \text{if } q \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

که $q = r/h$ فاصله بین ذرات را نشان می‌دهد. بدیهی است که دقت نتایج حاصل از روش SPH به میزان قابل‌توجهی به انتخاب تابع هسته وابسته است.

در روش SPH معادله بقای تکانه برای ذره a به‌صورت است:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \bar{\mathbf{v}}_{Wab} + \mathbf{g} \quad (7)$$

\mathbf{g} شتاب گرانش است؛ P_a و ρ_a به ترتیب فشار و چگالی ذره "a" هستند؛ P_b و ρ_b فشار و چگالی ذره "b" می‌باشند و Π_{ab} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

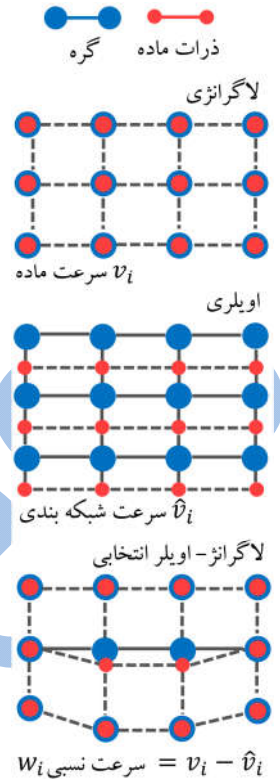
$$\mu_{ab} = \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{\mathbf{r}_{ab}^2 + 0.01h^2} \quad (9)$$

$$\bar{c}_{ab} = \frac{c_a + c_b}{2} \quad (10)$$

$$\bar{\rho}_{ab} = \frac{\rho_a + \rho_b}{2} \quad (11)$$

$\alpha = 0.1$ و $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$ و $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$ می‌باشد. c_a و c_b به ترتیب سرعت صوت، \mathbf{r}_a و \mathbf{r}_b موقعیت‌ها و \mathbf{v}_a و \mathbf{v}_b سرعت ذرات "a" و "b" هستند.

تغییرات چگالی سیال برای ذره a از طریق معادله پیوستگی



شکل ۱- رویکردهای لاگرانژی، اویلری و ALE

۲-۲- هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

روش هیدرودینامیک ذرات هموار به‌عنوان یک رویکرد محاسباتی بدون شبکه و مبتنی بر ذرات^۱ (MFP)، برای شبیه‌سازی رفتار سیالات توسعه یافته است. این روش نسبت به تکنیک‌های متداول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دارای مزایای قابل‌توجهی است. در SPH، سیستم سیال به‌صورت مجموعه‌ای از ذرات گسسته مدل‌سازی می‌شود که هر ذره حامل اطلاعات مکانی و ویژگی‌های فیزیکی سیال نظیر چگالی، فشار و سرعت است.

روش SPH به‌طور ذاتی یک روش درون‌یابی محسوب می‌شود و برای شبیه‌سازی مسائل دارای تغییرشکل‌های بزرگ در اندرکنش موج سیال-سازه، که در آن‌ها اعوجاج قابل‌توجهی در میدان سیال رخ می‌دهد، بسیار مناسب است. در این روش، هر کمیت فیزیکی $A(r)$ در حوزه Ω از طریق انتگرال درون‌یابی به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۵، ۲۶]:

$$A(\vec{r}) = \int_{\Omega} A(\vec{r}') W(\mathbf{r} - \vec{r}', h) d\vec{r}' \quad (4)$$

W نشان‌دهنده تابع هسته، \mathbf{r} موقعیت ذره، \vec{r}' موقعیت ذره مجاور و

¹ Mesh Free Particle (MFP)

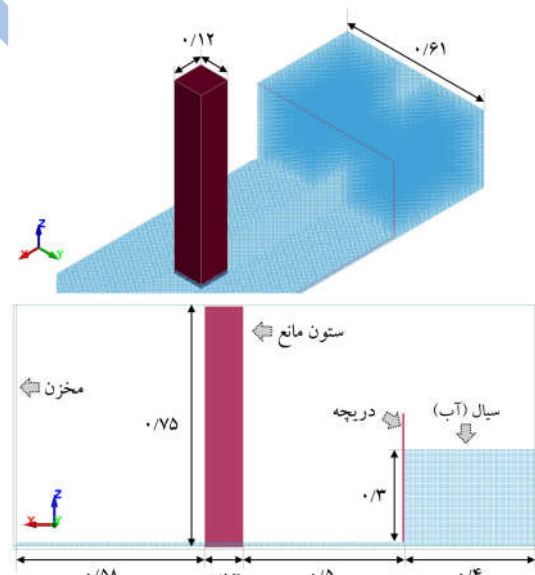
به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sum_b m_b v_{ab} \bar{v} W_{ab} \quad (12)$$

نرم افزار المان محدود دینامیکی غیرخطی LS-DYNA به عنوان یک نرم افزار تجاری پیشرفته در حوزه مسائل مهندسی هیدرولیک، از روش های عددی SPH و ALE بهره می برد. این نرم افزار با تلفیق روش المان محدود و رویکرد SPH، امکان شبیه سازی دقیق مسائل WSI را فراهم می کند و تحلیل جامع پدیده های پیچیده هیدرودینامیکی و رفتار سازه ای را میسر می سازد.

۳- تست آزمایشگاهی

شرایط آزمایشگاهی مطابق شکل ۳ شامل یک مخزن مستطیلی با ابعاد ۱/۶ m (طول) × ۰/۶۱ m (عرض) × ۰/۷۵ m (ارتفاع) است. حجم اولیه آب پشت دریچه با ابعاد ۰/۴ m (طول) × ۰/۶۱ m (عرض) × ۰/۳ m (ارتفاع) در نظر گرفته شده است. بر اساس شرایط آزمایشگاهی گزارش شده توسط گومز و همکاران [۲۳]، یک لایه نازک آب با ارتفاع تقریبی ۰/۰۱ m در کف مخزن قرار گرفته است تا شرایط اولیه جریان به درستی شبیه سازی شود. ستون مانع صلب با ابعاد ۰/۱۲ m × ۰/۱۲ m × ۰/۷۵ m، در بخش پایین دست دریچه و در میانه دامنه سیال قرار گرفته است. در طول آزمایش، نیروی خالص وارد بر ستون مانع و همچنین سرعت سیال در نقاط مختلف دامنه به منظور انجام آنالیز دقیق رفتار هیدرودینامیکی ثبت و ارزیابی شده اند.



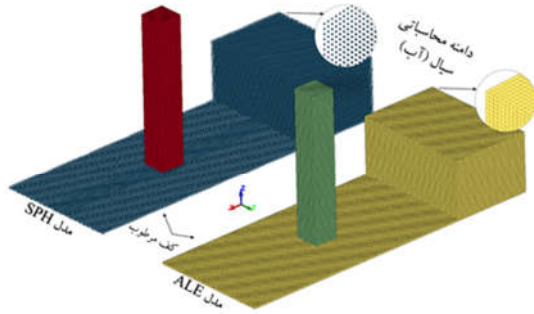
شکل ۳- تست آزمایشگاهی برای مسئله WSI (ابعاد به m)

۴- مدل سازی عددی

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در این پژوهش مسئله WSI با بهره گیری از دو روش عددی، یعنی ALE و SPH، در نرم افزار LS-DYNA شبیه سازی شده است.

۴-۱- مدل های مادی

جدول ۱ مشخصات مدل های ماده و ضرایب متناظر آن ها را برای اجزای مدل عددی، شامل سیال و ستون مانع، در هر دو روش SPH و ALE ارائه می دهد. ستون مانع با مقطع مربعی به عنوان یک جسم صلب مدل سازی شده است. در وضعیت شبکه بندی ریز دامنه سیال، در روش SPH تعداد ذرات سیال برابر با ۶۸۳،۳۹۴ ذره و در روش ALE تعداد المان های سیال برابر با ۷۹،۰۵۶ المان در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مدل های عددی SPH و ALE

برای توصیف رفتار سیال، از مدل ماده MAT_NULL همراه با معادله حالت^۱ (EOS) به منظور بیان رابطه فشار-چگالی استفاده شده است. این ترکیب امکان مدل سازی مناسب رفتار تراکم پذیر سیال و انتقال فشار در طول فرایند شکست سد را فراهم می کند.

جدول ۱- اجزای مدل عددی

آب	ستون مانع	
*Null	*Rigid	مدل ماده
*MURNAGHAN	-	معادله حالت
$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 100 \text{ kg/m}^3$	ضرایب مدل ماده
$P_c = -5 \times 10^4 \text{ Pa}$	$E = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$	
$MU = 0.001$	$\theta = 0.25$	
$\gamma = 7$	-	ضرایب معادله
$k_0 = 1.5 \times 10^5$	-	حالت
SPH: Particles		نوع المان در
ALE: Solid (Hex: CST)	Solid (Hex: CST)	شبکه بندی
SPH: ۶۸۳،۳۹۴	۱۱،۷۰۰	تعداد المان (ذره)
ALE: ۷۹،۰۵۶		

به منظور کاهش اثرات تراکم پذیری سیال و اطمینان از انتخاب گام زمانی مناسب، از معادله حالت (EOS) مورناگان^۲ [۲۷] با تراکم پذیری

¹ Equation of state (EOS)

² Murnaghan

ضعیف استفاده شده است. این معادله فشار را به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$p = k_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (13)$$

در معادله فوق، ρ_0 چگالی سیال در حالت سکون، γ ضریبی است که معمولاً برابر با ۷ در نظر گرفته می‌شود و k_0 به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که شرط زیر برقرار باشد:

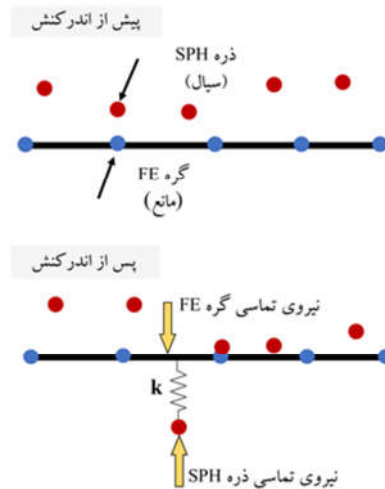
$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma k_0}{\rho_0}} \geq 10 v_{max} \quad (14)$$

که در آن c_0 سرعت صوت در سیال و v_{max} حداکثر سرعت جریان سیال است. این شرط تضمین می‌کند که اثرات تراکم‌پذیری به حداقل رسیده و گام زمانی در تحلیل‌های صریح، پایدار باقی بماند.

۲-۴- تماس‌ها و اندرکنش‌ها

در روش SPH برای مدل‌سازی تعامل بین سیال و مانع از الگوریتم تماس `AUTOMATIC_NODE_TO_SURFACE` استفاده می‌شود. این الگوریتم از معادلات روش پنالتی استفاده می‌کند که در آن نیروی تماس متناسب با عمق نفوذ و سختی عددی محاسبه می‌شود. در این رویکرد، کوپل پنالتی رفتاری مشابه یک سیستم فنری داشته و نیروهای تماسی را بر اساس عمق نفوذ و سختی فنر تعیین می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، ابتدای فنر به گره فرعی و انتهای آن به گره اصلی متصل می‌شود تا اندرکنش مناسب بین ذره سیال و مانع برقرار گردد.

در روش ALE نیز برای مدل‌سازی اندرکنش بین سیال و مانع، از الگوریتم `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID` استفاده شده است که امکان کوپل مناسب بین میدان سیال و سازه را فراهم می‌کند.



شکل ۵- تماس SPH-FE برای سیال و مانع

۵- بحث و بررسی نتایج

۱-۵- آنالیز حساسیت شبکه‌بندی دامنه سیال

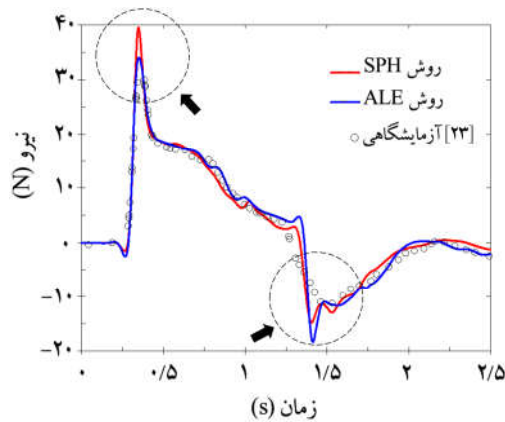
برای بررسی حساسیت شبکه‌بندی دامنه سیال، روش‌های SPH و ALE با اندازه‌های مختلف المان و تعداد ذرات متفاوت مورد ارزیابی

قرار گرفته‌اند. در روش ALE اندازه‌های المان $0.02m$ ، $0.01m$ و $0.005m$ در نظر گرفته شده است. متناظر با این مقادیر در روش SPH، تعداد ذرات $14,737$ ، $90,717$ و $683,394$ است.

شکل ۶ نتایج آنالیز حساسیت شبکه‌بندی را برای هر دو روش SPH و ALE نشان می‌دهد. در روش SPH با افزایش تعداد ذرات، نتایج مدل‌های دارای $90,717$ و $683,394$ ذره به همگرایی مناسبی رسیده‌اند (شکل ۶-الف). در روش ALE نیز نیروی وارد بر مانع صلب با سه اندازه المان مختلف روندی تقریباً یکسان داشته و همگرایی مطلوبی را نشان می‌دهد (شکل ۶-ب). به منظور تعادل بین دقت و کاهش زمان محاسبات، اندازه المان $0.01m$ برای مدل عددی ALE و تعداد ذره $683,394$ برای مدل SPH انتخاب شده‌اند.

تمامی محاسبات بر روی سیستم با پردازنده Intel Core i9-9880H (با فرکانس پایه $2.30GHz$) و حافظه $32GB$ انجام شده است. برای شبیه‌سازی‌ها از حل‌گر پردازش موازی انبوه^۱ (MPP) استفاده شده است.

¹ Massively Parallel Processing (MPP)



شکل ۷- نیروی موج سیال بر مانع صلب، نتایج عددی و آزمایشگاهی

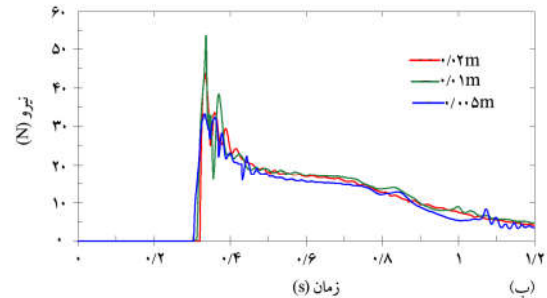
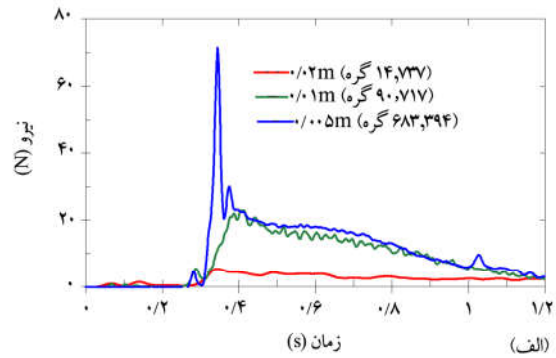
شکل ۷ نتایج نیروی وارد بر مانع را بر اساس روش‌های SPH، ALE و داده‌های آزمایش تجربی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، همبستگی قابل‌توجهی بین مقادیر عددی و نتایج تجربی وجود دارد. مطابق شکل ۷ روش SPH در مقایسه با روش ALE روند نزدیک‌تری برای نیروی سیال نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌دهد؛ بنابراین روش SPH برای مطالعات پارامتری انتخاب شده است.

علاوه بر تطابق عددی مناسب با داده‌های آزمایشگاهی، عملکرد برتر روش SPH در پیش‌بینی نیروی سیال وارد بر مانع ریشه در ویژگی‌های فیزیکی این روش دارد. روش SPH به‌عنوان یک رویکرد کاملاً لاگرانژی و بدون شبکه، توانایی ذاتی در شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ، شکست ناگهانی ستون آب، حرکت سطح آزاد و برخوردهای ضربه‌ای موج با سازه را بدون اعوجاج یا بازسازی شبکه فراهم می‌کند.

در مقابل، روش ALE با وجود کنترل نسبی اعوجاج شبکه، به دلیل وابستگی به شبکه محاسباتی، در مواجهه با گرادیان‌های شدید سرعت و فشار دچار پخش عددی و هموارسازی ناخواسته میدان جریان می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش دقت در ثبت پیک‌های نیروی هیدرودینامیکی گردد. از این‌رو، روش SPH از منظر فیزیکی نیز نمایش واقع‌بینانه‌تری از WSI در مسئله حاضر ارائه می‌دهد.

۵-۳- اثر آب‌بند بر کاهش امواج سیال

در این بخش تأثیر استفاده از آب‌بند در کاهش اثرات امواج بزرگ سیال بر سازه‌های ساحلی بررسی شده است. فاصله آب‌بند از مانع صلب (D) و ارتفاع آب‌بند (H) به‌عنوان پارامترهای اصلی مؤثر در کاهش امواج سیال می‌باشند. مطابق شکل ۸، طول و عرض آب‌بند (۰/۱۲m) در شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تأثیر آب‌بند برای سناریوهای مختلف با ارتفاع‌های ۰/۰۵m و ۰/۱ m و فواصل طولی از مانع صلب ۰/۱۵m، ۰/۳m و ۰/۴۵m با روش SPH بررسی شده است.



شکل ۶- آنالیز حساسیت شبکه‌بندی دامنه سیال؛

(الف) روش SPH (ب) روش ALE

به‌منظور مقایسه کارایی محاسباتی دو روش SPH و ALE، زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌های عددی بر روی سخت‌افزار یکسان مورد ارزیابی قرار گرفته است. زمان محاسباتی روش ALE با اندازه المان ۰/۱m حدود ۳۴ دقیقه و برای روش SPH با ۶۸۳,۳۹۴ ذره حدود ۳۶ دقیقه ثبت شد. اگرچه روش SPH زمان محاسباتی نسبتاً بیشتری نسبت به ALE دارد، اما این افزایش هزینه محاسباتی با حذف نیاز به بازسازی شبکه، پایداری عددی بالاتر در مواجهه با تغییر شکل‌های بزرگ و دقت بیشتر در پیش‌بینی ماکزیمم نیروی هیدرودینامیکی جبران می‌شود.

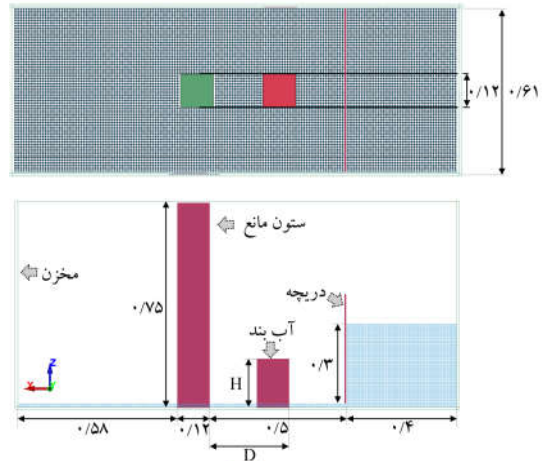
۵-۲- اعتبارسنجی مدل‌های عددی

جدول ۲ مقایسه بین پیشروی موج سیال و برخورد آن با مانع را در زمان‌های مختلف با استفاده از روش‌های SPH و ALE ارائه می‌دهد. موج متحرک در ۰/۳۵ s به مانع صلب برخورد کرده، در ۰/۶۵ s ثانیه به دیواره مخزن می‌رسد و در ادامه موج بازگشتی تشکیل می‌شود. در نهایت سیال پس از ۲/۴ s به حالت پایدار می‌رسد.

نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد تاریخچه زمانی نیروی وارد بر مانع و نیز زمان‌بندی پدیده‌های کلیدی جریان (زمان برخورد موج با مانع، رسیدن موج به دیواره مخزن و تشکیل موج بازگشتی) با روندهای گزارش‌شده در مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های شکست سد دارای مانع هم‌خوانی دارد. الگوی افزایش ناگهانی نیرو در لحظه برخورد اولیه و سپس افت و نوسان نیرو در مرحله بازگشت موج، همان رفتاری است که در آزمایش‌های مرجع مشاهده شده است [۲۳].

سیال در سه نقطه مشخص، همراه با وضعیت حرکت موج سیال در زمان‌های متناظر، برای آببندهای با ارتفاع کم و زیاد به ترتیب در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نمایش داده شده است. به طور کلی، کاهش ارتفاع آببند و افزایش فاصله افقی بین آببند و مانع صلب منجر به افزایش نیروی وارد بر مانع می‌شود.

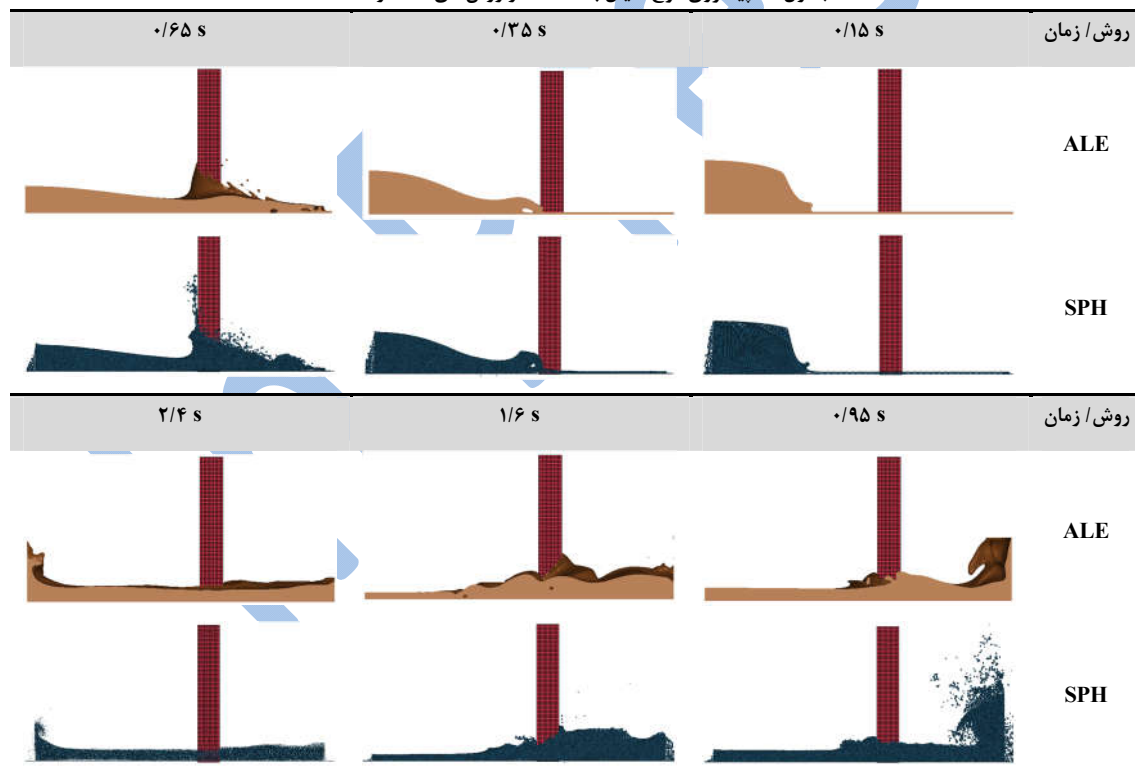
در تمامی مدل‌ها، افزایش ارتفاع آببند و کاهش فاصله افقی آن از مانع صلب منجر به کاهش حداکثر نیروی برخورد سیال به کمتر از ۳۹/۹N (مقدار مبنا بدون آببند، مطابق جدول ۳) شده است.



شکل ۸- مدل عددی با آببند (ابعاد به m)

شکل ۹ تاریخچه زمانی نیروی وارد بر مانع صلب را برای مدل‌های عددی ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد. حداکثر نیروی برخورد

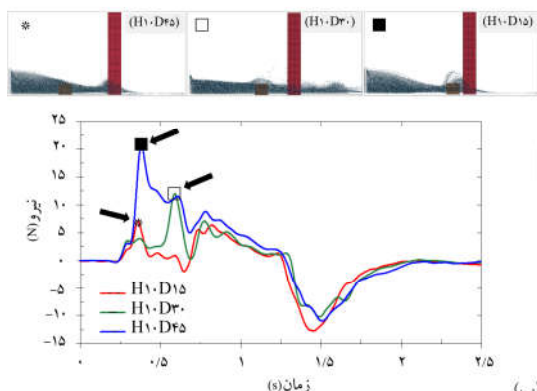
جدول ۲- پیشروی موج سیال با استفاده از روش‌های ALE و SPH



جدول ۳- مطالعه پارامتری برای بررسی اثر آببند

مدل	روش محاسباتی	D (m)	H (m)	طول (m)	عرض (m)	F_{max} (N)
SPH۰۱	SPH	بدون آببند	بدون آببند	۰/۱۲	۰/۱۲	۳۹/۹
ALE۰۱	ALE	بدون آببند	بدون آببند	۰/۱۲	۰/۱۲	۳۴

Test ۱		آزمایشگاهی			
۳۸					
۱۳/۴			۰/۱۵	SPH	H۵D۱۵
۲۲/۸		۰/۰۵	۰/۳		H۵D۳۰
۲۴/۴			۰/۴۵		H۵D۴۵
۷/۱۵			۰/۱		H۱۰D۱۵ L۱۲-H۱۰D۱۵ W۱۲-H۱۰D۱۵
۱۲				۰/۳	H۱۰D۳۰
۲۰/۸				۰/۴۵	H۱۰D۴۵
۹/۸	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۱	۰/۱۵	L۲۴-H۱۰D۱۵
۱۰/۱	۰/۱۲	۰/۳۶			L۳۶-H۱۰D۱۵
۹/۲	۰/۲۴	۰/۱۲			W۲۴-H۱۰D۱۵
۱۲/۷	۰/۳۶	۰/۱۲			W۳۶-H۱۰D۱۵



شکل ۹- نیروی مانع صلب با آب‌بند (الف) ارتفاع کم (ب) ارتفاع زیاد

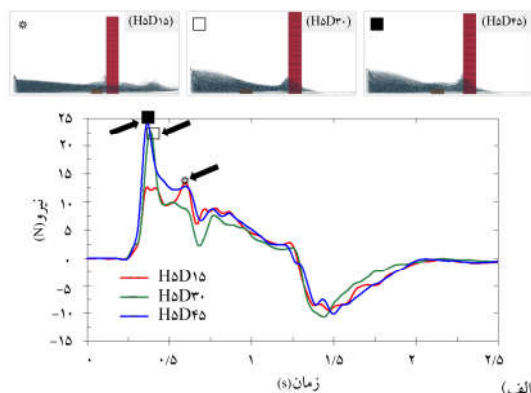
۵-۳-۱- تأثیر هندسه سطح مقطع آب‌بند

به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی آب‌بند بر پیشروی موج سیال و حداکثر نیروی وارد بر مانع، چهار هندسه متفاوت شامل مقطع دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای رو به مانع، نیم‌دایره‌ای پشت به مانع و مربعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۰).

بر اساس نتایج جدول ۴، بیشترین مقدار نیرو (F_{max}) معادل $27/1 N$ مربوط به مقطع دایره‌ای بوده است، در حالی که کمترین مقدار آن $9/4 N$ برای مقطع نیم‌دایره‌ای پشت به مانع مشاهده شده است که عملکرد بهتری در کاهش نیروی هیدرودینامیکی داشته است. از منظر فیزیکی، تفاوت در عملکرد هندسه‌های مختلف آب‌بند به نحوه برهم‌کنش موج سیال با سطح آب‌بند و الگوی انحراف جریان بازمی‌گردد. در مقطع دایره‌ای، برخورد موج با سطح انحنادار منجر به تمرکز موضعی فشار و هدایت بخش قابل‌توجهی از تکانه سیال در راستای مانع می‌شود که افزایش نیروی برخورد را به دنبال دارد. در مقابل، مقطع نیم‌دایره‌ای پشت به مانع با ایجاد یک سطح تدریجی در

همان‌طور که در جدول ۳ و شکل ۹ نشان داده شده است، مقایسه بین مدل‌های H۵D۱۵ با $F_{max}=13/4 N$ و H۱۰D۴۵ با $F_{max}=7/5 N$ حاکی از آن است که افزایش ارتفاع آب‌بند (H) در مقایسه با کاهش فاصله افقی (D) تأثیر بیشتری بر کاهش نیروی برخورد موج دارد.

این نتیجه با برداشت فیزیکی رایج در یافته‌های سایر محققان هم‌خوان است؛ زیرا افزایش ارتفاع مانع، مسیر مؤثر انتشار موج را محدود کرده و بخش بزرگ‌تری از تکانه موج را پیش از رسیدن به سازه اصلی مستهلک یا منحرف می‌کند، در حالی که تغییر فاصله عمدتاً زمان رسیدن موج و الگوی بازتاب موج را تعدیل می‌نماید [۱۹، ۲۰]. بنابراین، در دامنه بررسی‌شده، هندسه قائم آب‌بند (ارتفاع) نقش تعیین‌کننده‌تری در کنترل شدت برخورد اولیه دارد.



با توضیحات فیزیکی ارائه شده در مطالعات جریان سطح آزاد هم‌خوان است؛ به‌گونه‌ای که مقاطع با انحنای پیوسته معمولاً با کاهش انعکاس مستقیم و تضعیف جدایش جریان، به اتلاف انرژی مؤثرتری نسبت به مقاطع با لبه‌های تیز منجر می‌شوند [۲۳].

این نتایج بیانگر آن است که انتخاب مناسب هندسه آب‌بند می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی طراحی سازه‌های هیدرولیکی و کاهش اثرات مخرب امواج سیال در کاربردهای مهندسی ایفا کند.

جهت انتشار موج، باعث پخش تدریجی انرژی، کاهش انعکاس مستقیم و افزایش انحراف جانبی جریان می‌شود. این رفتار موجب کاهش شدت برخورد موج و افت محسوس نیروی هیدرودینامیکی وارد بر مانع می‌گردد.

علاوه بر کاهش نیروی هیدرودینامیکی، هندسه سطح مقطع آب‌بند نقش مهمی در الگوی انعکاس موج و تشکیل گردابه‌ها در ناحیه پشت آب‌بند ایفا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در هندسه‌هایی با لبه‌های تیز، نظیر مقطع مربعی، برخورد موج منجر به جدایش ناگهانی جریان و تشکیل گردابه‌های ناپایدار در ناحیه پشت آب‌بند می‌شود که با نوسانات موضعی فشار همراه است. در مقابل، مقاطع دارای انحنای پیوسته، به‌ویژه مقطع نیم‌دایره‌ای پشت به مانع، موجب هدایت تدریجی جریان و کاهش شدت انعکاس مستقیم موج می‌گردند.

این رفتار باعث تضعیف ساختار گردابه‌ای، افزایش اتلاف انرژی از طریق پخش تدریجی تکانه و در نهایت کاهش نیروی بازتابی منتقل شده به مانع می‌شود. از این رو، هندسه آب‌بند نه تنها بر مقدار نیروی حداکثری، بلکه بر سازوکارهای فیزیکی اتلاف انرژی موج شامل انعکاس، انحراف جریان و تشکیل گردابه‌ها نیز تأثیرگذار است. این روند

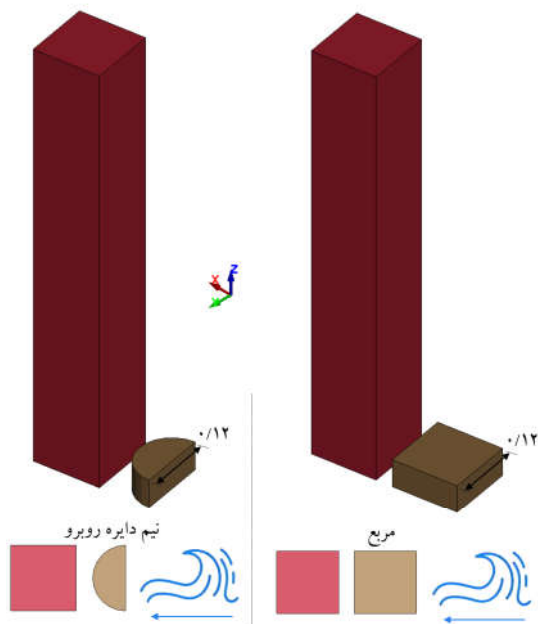
جدول ۴- اندرکنش موج سیال با مانع صلب با وجود آب‌بند دارای مقاطع هندسی مختلف

مربع	نیم‌دایره پشت	نیم‌دایره روبرو	دایره	
				۰/۲۷ s
				۰/۶۶ s
				۱ s
				۱/۵ s
				۲/۵ s
				۴ s

۵-۳-۲- تأثیر ابعاد طولی و عرضی آببند

شکل ۱۱ افزایش ابعاد آببند مقطع مربعی را در جهت‌های طولی (محور x) و عرضی (محور y) به ۰/۱۲m، ۰/۲۴m و ۰/۳۶m نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲-الف نشان داده شده است، افزایش مقطع طولی آببند منجر به کاهش حداکثر نیروی سیال وارد بر مانع صلب به ۹/۸ N شده که بیانگر کاهش تقریبی ۲۸٪ برای مدل W۲۴-H۱۰D۱۵ است. در مقابل، با افزایش ابعاد آببند در جهت عرضی، حداکثر نیروی ناشی از موج از ۱۳/۶ N به ۹/۲ N کاهش یافته که معادل کاهش تقریبی ۳۳٪ است (شکل ۱۲-ب).

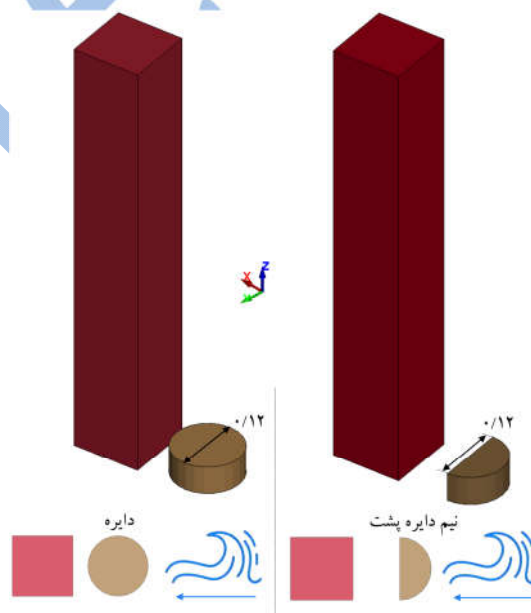
از دیدگاه فیزیکی، تفاوت عملکرد ابعاد طولی و عرضی آببند به نحوه توزیع و انحراف جریان سیال در پهنای موج بازمی‌گردد. افزایش بعد طولی آببند عمدتاً زمان تماس موج با سازه را افزایش داده و موجب مستهلک‌شدن بخشی از انرژی موج از طریق اصطکاک و جدایش جریان در امتداد مسیر حرکت می‌شود. با این حال، بخش قابل‌توجهی از تکانه موج همچنان در راستای اصلی انتشار حفظ شده و به مانع منتقل می‌گردد.

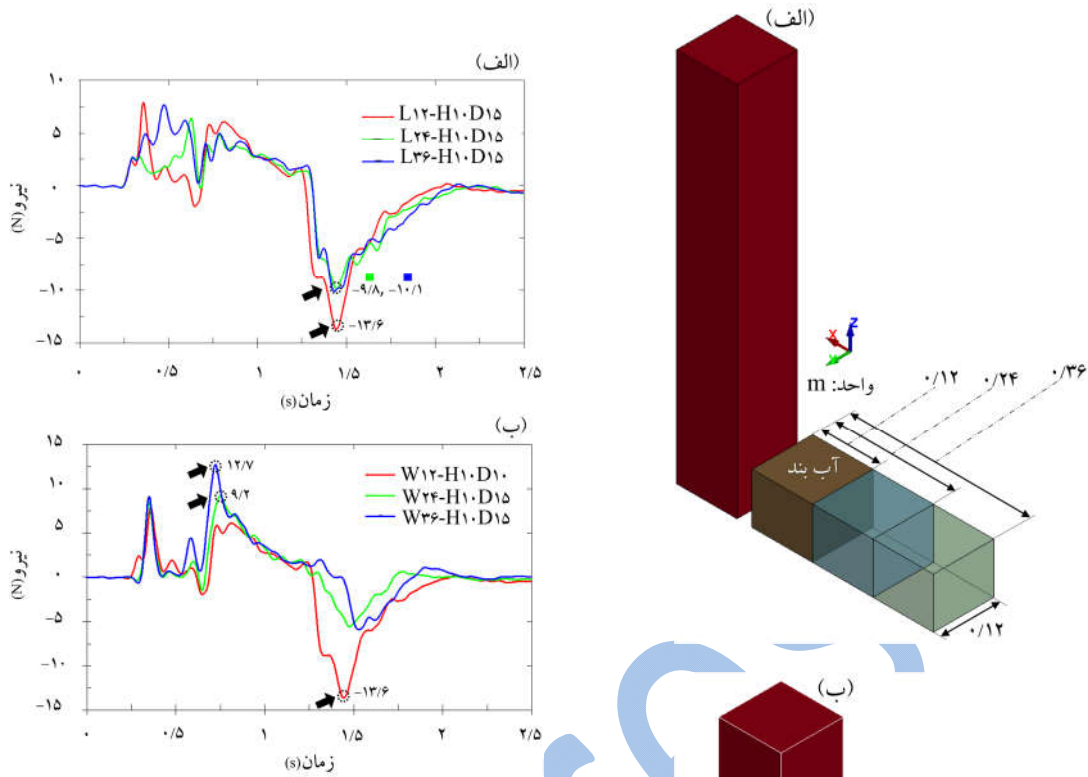


شکل ۱۰- هندسه‌های مقطع آببند برای مدل H۵D۱۵

در مقابل، افزایش بعد عرضی آببند موجب گسترش ناحیه برخورد موج، انحراف جانبی جریان و توزیع یکنواخت‌تر فشار در پهنای موج می‌شود. این پدیده با کاهش تمرکز موضعی تکانه و افزایش اتلاف انرژی از طریق پراکندگی جانبی جریان همراه است.

بنابراین، تغییر هندسه آببند در راستای عرضی در قیاس با بعد طولی آن تأثیر بیشتری در کاهش نیروهای هیدرودینامیکی دارد. این نتایج بر اهمیت بهینه‌سازی هندسه آببند تأکید می‌کند.



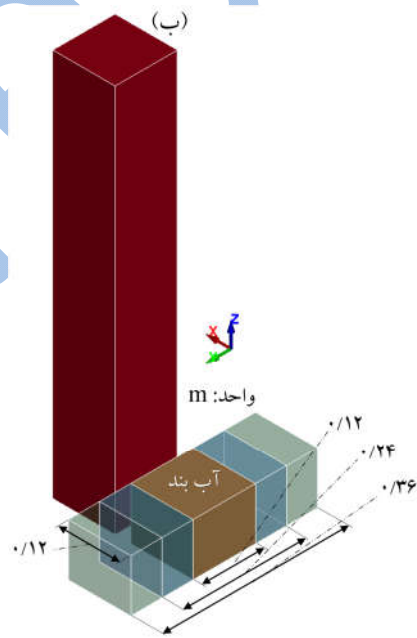


شکل ۱۲- نیروی سیال بر مانع صلب با هندسه مربعی آب‌بند
(الف) افزایش بعد طولی، (ب) افزایش بعد عرضی

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار دینامیکی غیرخطی المان محدود LS-DYNA، دو روش عددی SPH و ALE به‌منظور شبیه‌سازی اثرات امواج سیال ناشی از شکست سد بر سازه‌های ساحلی مرتفع به کار گرفته شد. نوآوری اصلی این مطالعه در توسعه و به‌کارگیری یک چارچوب عددی سه‌بعدی یکپارچه مبتنی بر کوپل چندفازی این دو روش نهفته است که امکان تحلیل دقیق‌تر اندرکنش موج سیال-سازه را در مقایسه با کدهایی نظیر DualSPHysics [۲۴]، که عمدتاً بر یک رویکرد خاص تمرکز دارند، فراهم می‌کند. در این چارچوب، اثر پارامترهای هندسی کلیدی آب‌بند شامل ارتفاع‌های مختلف آب‌بند H (0.5m و 1m) و فواصل طولی از مانع صلب D (0.15m، 0.3m و 0.45m) با لحاظ هندسه‌های مختلف سطح مقطع به‌صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی حاصل از تاریخچه زمانی نیروی سیال وارد بر مانع صلب تطابق قابل‌توجهی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد و صحت مدل توسعه‌یافته را تأیید می‌کند. نتایج به دست آمده شاخص‌های طراحی کاربردی را برای بهینه‌سازی آب‌بندهای ساحلی ارائه می‌دهد که می‌تواند در کاهش اثرات مخرب امواج ناشی از شکست سد و سیلاب‌های ناگهانی مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌های کلیدی این پژوهش عبارت‌اند از:

- روش SPH نسبت به روش ALE از مزیت اجتناب از هزینه بالای بازسازی شبکه برخوردار است و امکان مدیریت و غیرفعال‌سازی ذرات پراکنده خارج از دامنه شبکه‌بندی را در طول فرآیند محاسباتی فراهم



شکل ۱۱- هندسه مربعی آب‌بند برای مدل H10-D15
(الف) افزایش بعد طولی، (ب) افزایش بعد عرضی

[7]. Ye, T., et al., *Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for complex fluid flows: Recent developments in methodology and applications*. Physics of Fluids, 2019. **31**.(1)

[8]. Wang, F.Z., et al., *Recent advancements in fluid dynamics: drag reduction, lift generation, computational fluid dynamics, turbulence modelling, and multiphase flow*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024. **49**(8): p. 10237-10249.

[9]. Nishiura, D., M. Furuichi, and H. Sakaguchi, *Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing*. Computer Physics Communications, 2015. **194**: p. 18-32.

[10]. Xu, X., Y.-L. Jiang, and P. Yu, *SPH simulations of 3D dam-break flow against various forms of the obstacle: Toward an optimal design*. Ocean Engineering, 2021. **229**: p. 108978.

[11]. Zheng, X., et al., *SPH simulation of sediment movement from dam breaks*. Water, 2023. **15**(17): p. 3033.

[12]. Tian, B. and L. Li, *A five-equation model based global ale method for compressible multifluid and multiphase flows*. Computers & Fluids, 2021. **214**: p. 104756.

[13]. Yang, Y., et al., *An ALE approach to mechano-chemical processes in fluid-structure interactions*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2017. **84**(4): p. 199-220.

[14]. Siemann, M. and B. Langrand, *Coupled fluid-structure computational methods for aircraft ditching simulations: Comparison of ALE-FE and SPH-FE approaches*. Computers & structures, 2017. **188**: p. 95-108.

[15]. Cai, Z., et al., *Evaluation of rigid body force in liquid sloshing problems of a partially filled tank: Traditional CFD/SPH/ALE comparative study*. Ocean Engineering, 2021. **236**: p. 109556.

[16]. Eiris, A., et al., *MLS-SPH-ALE: A review of meshless-FV methods and a unifying formulation for particle discretizations*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023. **30**(8): p. 4959-4981.

[17]. Carrington, D.B., et al., *Three-dimensional local ALE-FEM method for fluid flow in domains containing moving boundaries/objects interfaces*. 2015, Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States).

[18]. Zeng, X., K. Li, and G. Scovazzi, *An ALE/embedded boundary method for two-material flow simulations*. Computers & Mathematics with Applications, 2019. **78**(2): p. 335-361.

[19]. Aureli, F., et al., *Review of experimental investigations of dam-break flows over fixed bottom*. Water, 2023. **15**(6): p. 1229.

[20]. Wang, B., et al., *Experimental and numerical investigations of similarity for dam-break flows on wet bed*. Journal of Hydrology, 2020. **583**: p. 124598.

[21]. Kocaman, S., et al., *Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel*. Water, 2020. **12**(4): p. 1124.

[22]. Kusuma, M.S.B., T. Setiawati, and M. Farid, *Experimental model of dam break flow around several blockages configurations*. GEOMATE Journal, 2019. **16**(58): p. 26-32.

[23]. Gómez-Gesteira, M., et al., *SPHysics-development of a free-surface fluid solver-Part 2: Efficiency and test cases*. Computers & Geosciences, 2012. **48**: p. 300-307.

می‌کند.

- در آنالیز همگرایی شبکه‌بندی، اندازه المان 0.1 m برای مدل ALE و 683.394 ذره برای مدل SPH انتخاب شد. این انتخاب، ضمن حفظ دقت قابل قبول، هزینه و زمان محاسبات را کاهش داد.

- روش SPH در مقایسه با روش ALE، تطابق بهتری با داده‌های تجربی، به‌ویژه در ثبت مقادیر حداکثر و حداکثر نیروی موج و پیشروی آن ارائه می‌دهد. از طرف دیگر برتری SPH ناشی از ماهیت ذره‌ای و لاگرانژی محض آن است که آن را برای مدل‌سازی ذاتی و دقیق‌تر پدیده‌های WSI، شامل تغییر شکل‌های شدید سطح آزاد و ناپایداری‌ها بدون نیاز به ردیابی سطح پیچیده، حفظ دقیق پایداری جرم و محاسبه نیروهای ضربه‌ای مناسب‌تر می‌سازد. به همین دلیل، این روش برای مطالعات پارامتری انتخاب شده است.

- افزایش ارتفاع آب‌بند و کاهش فاصله افقی از مانع، حداکثر نیروی برخورد سیال F_{max} را در تمامی مدل‌ها به کمتر از $39/9\text{ N}$ (مقدار مینا بدون آب‌بند) کاهش داد.

- مقایسه بین مدل‌های $H\delta D15$ ($F_{max}=13/4\text{ N}$) و مدل‌های $H10D45$ ($F_{max}=7/5\text{ N}$) نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع آب‌بند (H) در مقایسه با کاهش فاصله (D) تأثیر بیشتری در کاهش نیروی موج سیال دارد.

- آنالیز چهار نوع هندسه مختلف برای مقطع آب‌بند (دایره، نیم‌دایره رو به مانع، نیم‌دایره پشت به مانع و مربع) نشان می‌دهد بیشترین و کمترین مقدار F_{max} به ترتیب با مقادیر $27/1\text{ N}$ و $9/4\text{ N}$ برای مقاطع هندسی دایره و نیم‌دایره پشت به مانع می‌باشد.

- افزایش مقطع طولی آب‌بند نیروی سیال را به $9/8\text{ N}$ (افت 28%) و افزایش مقطع عرضی آن، این نیرو را به $9/2\text{ N}$ (افت 33%) می‌کاهد؛ بنابراین، تغییر هندسه آب‌بند در راستای عرضی تأثیر قابل‌ملاحظه‌تری نسبت به راستای طولی آن به‌منظور کاهش نیروهای هیدرودینامیکی موج سیال بر مانع صلب دارد.

7- مراجع

- [1]. An, R.-d., et al., *Numerical simulation of tsunami-like wave impacting on breakwater by CLSVOF/IB method*. China Ocean Engineering, 2021. **35**(5): p. 676-686.
- [2]. Maghsoodi, R., A. Khademalrasoul, and H. Sarkardeh, *3D numerical simulation of dam-break flow over different obstacles in a dry bed*. Water Supply, 2022. **22**(4): p. 4015-4029.
- [3]. Capasso, S., et al., *A numerical validation of 3D experimental dam-break wave interaction with a sharp obstacle using DualSPHysics*. Water, 2021. **13**(15): p. 2133.
- [4]. Tian, X., *Smooth particle hydrodynamics simulation of dam-break impacting different obstacles*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. IOP Publishing.
- [5]. Mokbel, M. and S. Aland, *An ALE method for simulations of axisymmetric elastic surfaces in flow*. International journal for numerical methods in fluids, 2020. **92**(11): p. 1604-1625.
- [6]. نوربخش، ا. ف. روزبهانی، and م. کوهینی تفرشی، شبیه‌سازی جریان ماسه به وسیله روش هیدرودینامیک ذرات هموار با تراکم‌پذیری جزئی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۲۰۱۹. **۴۹**(۲): ۳۳-۴۶.

[24]. Crespo, A.J., et al., *DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*. Computer Physics Communications, 2015. **187**: p. 204-216.

[25]. Kelager, M., *Lagrangian fluid dynamics using smoothed particle hydrodynamics*. University of Copenhagen :Department of Computer Science, 2006. **2**.

[26]. Sunara, M., et al., *Numerical analysis of pressures on rigid structures using the smoothed particle hydrodynamics method*. Scientia iranica, 2021. **28**(3): p. 1066-1078.

[27]. Yreux, E. *Fluid flow modeling with SPH in LS-DYNA®*. in *Proceedings of the 15th International LS_DYNA Users Conference, Dearborn, MI, USA*. 2018.

In Press