

مدل سازی عددی موج ضربه ای حاصل از لغزش توده صلب و دانه ای در نرم افزار 3D – FLOW

محمد رشیدی¹، علیرضا یزدانی²، شمس بصیرت³، محسن سعادت⁴

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. پست الکترونیکی:

rashidy_rashid@yahoo.com، تلفن: 09188725112

2- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

پست الکترونیکی: a-yazdani@iaun.ac.ir، تلفن: 09131175770

3- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

پست الکترونیکی: basirat.sh@pci.iaun.ac.ir، تلفن: 09125325229

4- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

پست الکترونیکی: Mohsen.saadat@pci.iaun.ac.ir، تلفن: 09133052396

نویسنده مسئول: علیرضا یزدانی

چکیده

مهمترین عامل شکل گیری امواج ضربه ای در مخزن سد، که بسیار مخرب هستند ناشی از زمین لغزش دیواره های مخزن سد می باشد. جهت بررسی حرکت اجسام شناور، مستغرق و غوطه ور در آب، مناسب ترین شیوه، استفاده از مدل سازی عددی است. روش حجم محدود از مدل سازی- های عددی شناخته شده ای است که در اندر کنش سیال و سازه و انتشار امواج ضربه ای کاربرد زیادی دارد. در این مقاله جهت بررسی عددی امواج حاصل از لغزش توده صلب و دانه ای، مراحل کلی روش مدل سازی در نرم افزار 3D – FLOW که مبتنی بر روش حجم محدود است ارایه خواهد شد. همچنین نتایج خروجی حل عددی مدل امواج حاصل از لغزش، به کمک نرم افزار مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: امواج ضربه ای، توده لغزشی، مدل عددی، 3D – FLOW

Numerical modeling of impulse waves resulting from solid and granular mass sliding in FLOW-3D software

Abstract

The most important factor in the formation of impulse waves in the dam reservoir, which are very destructive, is caused by the landslide of the dam reservoir walls. In order to study the movement of floating, submerged and submerged objects in water, the most appropriate method is to use numerical modeling. The finite volume method is one of the well-known numerical modeling methods that is widely used in the interaction of fluid and structure and the propagation of impulse waves. In this article, in order to numerically study the waves resulting from the sliding of solid and granular masses, the general steps of the modeling method in the FLOW-3D software, which is based on the finite volume method, will be presented. Also, the results of the numerical solution of the model of waves resulting from the sliding have been examined with the help of the software.

Keywords: Impulse waves, Sliding mass, Numerical model, FLOW-3D

مقدمه

مهمترین عامل شکل‌گیری امواج ضربه‌ای در مخازن سدها، ناشی از زمین لغزش دیواره‌های مخزن سد است چرا که این امواج که به امواج ضربه‌ای معروف هستند بسیار عظیم و مخرب می‌باشند. مراحل این پدیده شامل تولید موج، انتشار، بالا‌روی موج و روگذری از بدنه سد می‌باشد. اهمیت مطالعات جامع در خصوص لغزش اجسام و سقوط به داخل آب و تشکیل موج ضربه‌ای باعث شده است تا محققان زیادی در خصوص این پدیده علمی تحقیق نمایند.

مونگان و کاس^۱ (2000) در مطالعات خویش با استفاده از روش لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار، نسبت به شبیه‌سازی عددی تولید و انتشار امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش روستحی برای یک توده لغزنده صلب اقدام کردند.

گریلی^۲ و همکاران (2002) برای شبیه‌سازی تولید و انتشار امواج ناشی از زمین لغزش زیرسطحی از مدل سه‌بعدی استفاده کردند. مدل عددی سه بعدی بکار رفته، مدل تانک موج عددی^۳ بود.

واتس^۴ و همکاران (2003) با استفاده از سه نوع مصالح دانه‌ای از جنس شیشه، فولاد و سرب به عنوان توده لغزنده، آزمایش‌هایی را در مورد تاثیر تغییر شکل توده لغزنده بر روی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش روستحی انجام دادند.

مونگان^۵ و همکاران (2003) روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار را برای مدل‌سازی موج

ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش ارائه دادند. آنان جهت مدل‌سازی موج با مشخصات موج اسکات‌راسل، به جای سقوط آزاد از لغزش بلوک مورد نظر روی یک سطح شیب دار استفاده کردند.

گریلی و واتس^۶ (2005) نسبت به شبیه‌سازی دو بعدی امواج ناشی از لغزش زیرسطحی اقدام کردند. آنها دو نوع توده صلب و تغییر شکل‌پذیر را مدل نموده و برای اعمال شرایط مرزی مربوط به توده لغزش از توابعی متناسب با هندسه، صلبیت توده و هیدرودینامیک استفاده کردند.

عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2007) امواج تولید شده ناشی از زمین لغزش زیرسطحی را با بکارگیری مدل عددی دوبعدی توسعه یافته، بررسی کردند.

عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (1387) با یک مدل آزمایشگاهی مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را درباره امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش زیرسطحی دیواره شیب‌دار انجام دادند.

عطایی آشتیانی و یآوری رامشه (2011) مدل عددی دو بعدی مرتبه 4 بوسینسک را برای تخمین ضربه امواج تولید شده بوسیله لغزش توده داخل مخزن سد بکار بردند.

واپرولت^۷ و همکاران (2012) به مطالعه امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش سطحی به صورت آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی پرداختند. شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت.

آرامی فدافن و حسامی کرمانی (1392) با انجام تحقیقی به بررسی امواج ایجاد شده ناشی از

¹ Monaghan & A.kos

² Grilli

³ Numerical- Wave-Tank_(NWT)

⁴ Watts

⁵ Monagan

⁶ Grilli & Watts

⁷ Viroulet

ریزش مستغرق و نیمه مستغرق پرداخته و نتیجه گرفتند که دامنه موجی که از ریزش‌های نیمه مستغرق ایجاد می‌شود از ریزش‌های مستغرق بیشتر است.

آن و همکاران (2016) فرآیند تولید امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش را با یک مدل جدید دو ماده ای آب و خاک شبیه‌سازی کردند. دو نمونه آزمایشی امواج تولید شده توسط یک زمین لغزش آهسته و یک زمین لغزش سریع، به منظور سنجش اعتبار مدل پیشنهادی شبیه‌سازی شدند.

خولوسی و کبدسلی⁸ (2016) در مقاله‌ای به شبیه‌سازی عددی امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش‌های زیرسطحی و روسطحی بر روی مخزن سد پرداختند. نتایج نشان داد حداکثر دامنه تاج موج در امواج زمین لغزش روسطحی به شدت تحت تاثیر زاویه شیب کف، سرعت برخورد، ضخامت، نوع حرکت و تغییر شکل زمین لغزش می‌باشد.

فاضلی و عسگری (1399) در یک پژوهش با مدل‌سازی عددی یک زمین لغزش واقعی، ورودی به سد بالای سیاه بیشه واقع در شمال ایران، به بررسی پارامترهای هندسی توده، فاصله از سد، شکل دره و سناریوهای سرعت توده پرداختند.

مدل‌سازی عددی از لحاظ مهندسی و اقتصادی، مناسب‌ترین شیوه جهت بررسی حرکت اجسام شناور، مستغرق و غوطه‌ور در آب می‌باشد. از مدل‌سازی‌های عددی شناخته شده‌ای که در اندر کنش سیال و سازه و انتشار امواج ضربه‌ای قابل کاربرد است می‌توان به روش اجزا محدود⁹، روش اجزا مرزی¹⁰، روش حجم سیال¹¹، روش تفاضل محدود¹²، روش حجم محدود¹³ و روش

هیدرودینامیک ذرات هموار¹⁴ اشاره کرد. در این مقاله جهت بررسی عددی موج حاصل از لغزش توده صلب و دانه‌ای، روش مدل‌سازی در نرم افزار 3D - FLOW ارایه خواهد شد.

مواد و روش‌ها

معادلات مورد استفاده در نرم‌افزار 3D - FLOW شامل معادلات پیوستگی و ناویر استوکس می‌باشد. روش حل معادلات بر اساس روش حجم محدود است. برای سیال تراکم‌ناپذیر و جریان دائم، معادلات به صورت زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی

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

معادلات ناویر استوکس

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن u_i سرعت در جهت X ، P فشار کل، ρ چگالی سیال، g_i شتاب ثقل در جهت x_i و τ_{ij} تانسور تنش می‌باشد. روابط سه‌گانه در سه جهت حرکت که بصورت پایه‌ای در نرم‌افزار 3D - FLOW کاربرد دارند به شرح زیر می‌باشند:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (5)$$

⁸ Khooolosi & Kabdaşli

⁹ Finite-Element-Method_(FEM)

¹⁰ Boundary-Element-Method_(BEM)

¹¹ Volume-of-Fluid-Method_(VOF)

¹² Finite- Difference- Method_(FDM)

¹³ Finite- Volume- Method_(FVM)

¹⁴ Smoothed-Particle-Hydrodynamics_(SPH)

در معادلات فوق، ρ چگالی (kg/m^3)، t زمان (s)، p فشار (pa)، g شتاب ثقل (m/s^2)، μ ویسکوزیته دینامیکی (pa.s) و u ، v ، w ، بیانگر بردارهای سرعت به ترتیب در راستای محورها x ، y ، z (m/s) هستند (چن^{۱۵} و همکاران، ۱۹۹۹). با فرض جریان تراکم ناپذیر و چگالی ثابت، معادله پیوستگی به شکل زیر ارضا می‌گردد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

شبیه سازی جریان آشفته در نرم افزار FLOW – 3D به کمک یکی از پنج مدل آشفته زیر انجام می‌گردد:

1- مدل طول اختلاط پراتل^{۱۶}: این مدل ساده ترین مدل برای حل آشفته است و در آن، تولید و زوال آشفته در همه نقاط جریان در تعادل است:

$$P_T + G_T = \varepsilon_T \quad (7)$$

در رابطه فوق پارامترهای P_T و G_T و ε_T به ترتیب بیانگر مقادیر: تولید آشفته در اثر برش، تولید آشفته در اثر شناوری و اتلاف آشفته می‌باشند. اتلاف آشفته می‌تواند بصورت زیر هم نوشته شود:

$$\varepsilon_T = \text{CNU} \left(\frac{3}{2}\right)^{0.5} \frac{(K_T)^{3/2}}{\text{TLEN}} \quad (8)$$

در رابطه فوق مقدار پیش فرض CNU معادل 0/09 و پارامترهای K_T و TLEN به ترتیب بیانگر مقدار انرژی و مقیاس طول آشفته، توسط کاربر قابل تعریف است.

2- مدل یک معادله ای انرژی آشفته^{۱۷}: در این مدل ضریب لزجت توسط کاربر تعیین و مقدار پیش فرض آن عدد 1 بوده و برای مدل RNG مقدار آن 1/39 است.

3- مدل دو معادله ای $k-\varepsilon$ ^{۱۸}: در این مدل جهت حل معادله انتقال برای اتلاف آشفته، از پارامترهای CDIS1، CDIS2 و CDIS3 استفاده می‌گردد. مقدار این پارامترها توسط کاربر تعیین می‌گردد و برای مدل $k-\varepsilon$ به ترتیب دارای مقادیر پیش فرض 1/44، 1/92 و 0/2 می‌باشند.

4- مدل گروه های نرمال شده^{۱۹}: معادلات آن شبیه معادلات $k-\varepsilon$ است ولیکن مقادیر CDIS1 و CNU در این مدل به ترتیب معادل 1/42 و 0/085 می‌باشد. ضریب CDIS2 به کمک دو پارامتر انرژی جنبشی و تولید آشفته محاسبه می‌گردد. مجموع لزجت های ملکولی و گردابی بصورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\mu = \rho (v + v_T) \quad (9)$$

لزجت سینماتیکی آشفته (v_T) از رابطه زیر نیز محاسبه است:

$$v_T = \text{TLEN} \left(\frac{2K_T}{3}\right)^{0.5} \quad (10)$$

با جایگزینی طول آشفته با تابع اتلاف انرژی آشفته، لزجت سینماتیکی آشفته به شکل زیر ساده می‌شود:

$$v_T = \text{CNU} \frac{K_T^2}{\varepsilon_T} \quad (11)$$

در رابطه بالا، پارامتر CNU ضریب ثابتی است که توسط کاربر تعریف می‌شود. این ضریب در مدل $k-\varepsilon$ معادل 0/09 و در مدل RNG معادل 0/085 است.

5- مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ^{۲۰}: تمام ساختارهای آشفته، با استفاده از شبکه محاسباتی، قابل محاسبه اند.

¹⁸ Two equation ($k-\varepsilon$) model

¹⁹ Renormalized group (RNG) model

²⁰ Large eddy simulation model

¹⁵ Chen

¹⁶ Prandtl mixing-length model

¹⁷ One-equation, turbulent energy model

نرم افزار 3D – FLOW جهت شبیه سازی سقوط جسم به داخل آب، از روش دوفازی حجم سیال و جهت جداسازی دو فاز، از ترکیب روش های دوفازی VOF^{۲۱} و FAVOR^{۲۲}، استفاده می نماید.

الف- روش VOF: در حالت جریان با سطح آزاد، روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول ها، تعریف کمیتی به نام تابع حجم سیال^{۲۳} است. در این روش هیچگونه تغییر شکل و جابجایی شبکه وجود ندارد.

ب- روش FAVOR: این روش برای تعیین هندسه مدل بکار برده می شود. زمانی که دو روش VOF و FAVOR با هم ترکیب می شوند جزء حجمی سیال به عنوان بخشی از جزء خالی سلول تعریف می شود.

هندسه مخزن موج و توده های لغزشی

طبق مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008)، مخزن موج دارای عرض 2/5 متر، عمق 1/8 متر و طول 25 متر می باشد. شیب صفحه شیبدار برای دو حالت 45 و 60 درجه فرض می گردد. در شبیه سازی توده های صلب و دانه ای، به ترتیب از بلوک های هندسی B2a و T2 استفاده می شود. جهت توده های لغزشی دانه ای از مواد دانه ای با قطر متوسط (D50) حدود 7-9 میلی متر و جرم حجمی معادل $\rho = 1.8-2.0 \text{ ton/m}^3$ استفاده می گردد.

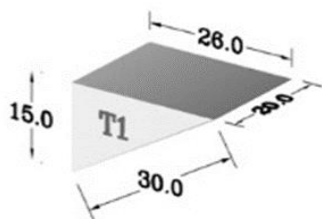
²¹ Volume of Fluid

²² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

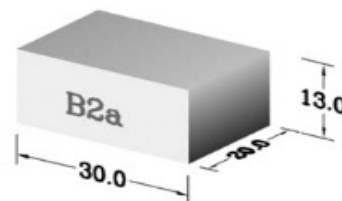
²³ Volume of fluid



شکل 1- نمای مخزن آزمایشگاهی موج برای شبیه سازی امواج ضربه ای ناشی از لغزش دیواره (عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی، 2008)



شکل 3- نمای شماتیک بلوک لغزشی دانه ای (عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی، 2008)



شکل 2- نمای شماتیک بلوک لغزشی صلب (عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی، 2008)

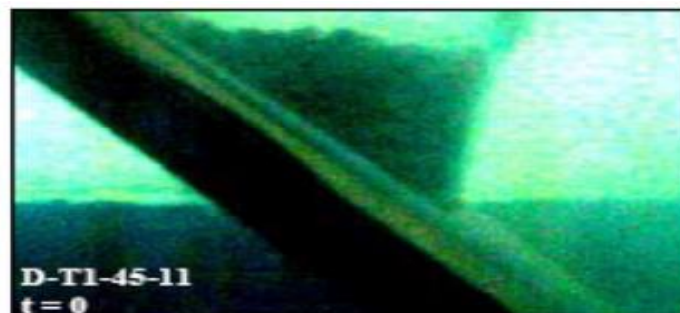
جدول 1- مشخصات بلوک های هندسی مورد استفاده در مدل سازی عددی (عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی، 2008)

Tag no.	V (m ³)	W _p (kg)	W _i (kg)	W _w (kg)	W _t (kg)	A (m ²)	h ₀ (kg/m ³)
B2	0.00780	3.92	3.10	7.80	14.82	0.0390	1900
T1	0.00390	2.84	0.67	3.90	7.41	0.0195	1900

V: solid block volume; W_w : weight of water; W_p: weight of perimeter steel plate;

W_t : total weight of sliding block; W_i: weight of additional insert plate;

γ: special gravity [= W_t/V]; A: cross section area.



شکل 4- نمونه ای از توده لغزشی دانه ای مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی (عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی، 2008)

لغزشی، صلب با زاویه شیب بستر لغزنده 45 درجه^{۲۵} و دانه‌ای با زوایای شیب بستر لغزنده 45 درجه^{۲۶} و 60 درجه^{۲۷} در مطالعه آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) می‌باشد.

پارامترهای متغیر قابل بررسی جهت انجام تحقیقات پژوهشی، شامل مشخصات توده لغزشی مانند شکل، حجم و ضخامت (T)، طول موازی با شیب بستر (B)، صلبیت، زاویه شیب بستر لغزنده (θ)، عمق غوطه ور شدن اولیه لغزش (h_{0C})، عمق آب ساکن در مخزن موج (h_0) و محل اولیه بلوک غوطه‌ور قبل از زمین لغزش (S'). با فرض ثابت بودن دیگر پارامترهای متغیر، برای دو حالت توده-های لغزشی صلب و دانه‌ای و برای زوایای شیب بستر لغزنده (θ) معادل 45 و 60 درجه، مدل سازی انجام می‌گردد.

مشخصات فیزیکی سیال

در مدل‌سازی انجام شده، سیال مورد نظر آب می‌باشد. شرایط تشکیل موج ضربه‌ای حاصل از لغزش توده لغزشی به داخل مخزن آب، به گونه‌ای است که در میزان ویسکوزیته سیال تغییری ایجاد نمی‌گردد. همچنین سرعت موج ضربه‌ای بالا نبوده و به جایی هم برخورد نمی‌کند. لذا سیال تراکم ناپذیر^{۲۴} در نظر گرفته می‌شود.

در نرم‌افزار FLOW – 3D با انتخاب زبانۀ Fluids سیالات مورد نظر به دو روش دستی و استفاده از پایگاه داده ای، به برنامه معرفی می‌شود. سیال مورد استفاده از نوع سیال لزج (آب زلال) و مشخصات فیزیکی آن در دمای 15 تا 20 درجه سانتیگراد شامل ویسکوزیته و وزن مخصوص سیال به ترتیب معادل $0/001 \frac{kg}{m \cdot s}$ و $1000 \frac{kg}{m^3}$ در نظر گرفته شده است.

مشخصات هندسی مدل عددی

مدل‌های عددی، منطبق بر آزمایشات مربوط به شماره 76، 106 و 109 به ترتیب سه حالت توده

²⁵ Case76-R-B2a-45-12

²⁶ Case106-D-T1-45-11

²⁷ Case109-D-T1-60-11

²⁴ Incompressible

جدول 2- مشخصات هندسی مدل‌های عددی ساخته شده در نرم افزار 3D FLOW

Case no.	Slide rigidity	Block tag	B (m)	T (m)	h_{0c} (m)	θ (deg)	h_0 (m)	S' (m)
76	R	B2a	0.30	0.13	0.025	45	0.50	0.5418
106	G.M	T1*	0.30	0.13	0.025	45	0.80	0.9660
109	G.M	T1*	0.30	0.13	0.025	60	0.80	0.8198

R: Rigid block (no deformable slide).

G.M: Granular material (deforming landslide).

*: initial shape of deforming slides.

شبکه‌بندی مدل توده لغزشی

نرم افزار 3D FLOW - دامنه جریان را به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیل شکل تقسیم‌بندی می‌کند. شبکه‌های مستطیلی با ساختار دارای مزیت‌های زیادی از جمله سادگی گسترش روش-های عددی و همچنین دقت و پایداری در حل‌های عددی هستند. ابتدا شبکه بندی مربوط به حالت توده لغزشی صلب را بررسی می‌کنیم.

برای حالت توده لغزشی صلب از هندسه‌ای مشابه با هندسه‌ی لطفی و همکاران (2013) استفاده شده است. برای انجام مش‌بندی، از ابزار مش بلاک²⁸ استفاده می‌گردد. در این حالت توسط نرم افزار یک شبکه حل مکعبی با تعداد سلول‌های پیش فرض ایجاد می‌شود. در مدل‌سازی انجام شده، مش بندی در سطح آب با تعریف مش پلان²⁹ ابعاد سلول‌ها کوچک‌تر انتخاب شده است و در غیر از مجاورت سطح آب که سلول‌ها به اندازه‌ای ریز شده که تغییرات سطح آب را به خوبی نمایش دهند در سایر نقاط مدل، ابعاد شبکه بندی بین 3 تا 6 سانتی متر می‌باشد.

انتخاب ابعاد شبکه بندی فوق بر مبنای آنالیز ابعادی مش انجام گردید و به عبارتی دیگر شبکه-بندی آنالیز حساسیت شده است. روش کار در این تحقیق نوعی سعی و خطا می‌باشد که در آن با تغییر

ابعاد، مش‌پلان‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. با انتخاب ابعاد مختلف مش در راستای طولی و عمقی، تغییرات ابعادی مختلف در مش‌بندی ایجاد می‌گردد. در هر مرحله از سعی و خطا، مش-بندی مدل مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج مطالعه آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. هدف از این کار انتخاب مناسب‌ترین مش‌بندی است تا خطای نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی به حداقل برسد. به دلیل استفاده نرم‌افزار از حلگرهایی که در آنها گسسته‌سازی معادلات، به کمک یکی از روشهای صریح³⁰ یا ضمنی³¹ انجام می‌گردد، نیازی به تعیین مقدار زمان صفر نمی‌باشد.

روشهای ضمنی گسسته‌سازی معادلات برای کلیه حالات و مقادیر گام زمانی، بصورت غیرمشروط پایدار می‌باشند. مبنای محاسباتی انتخاب گام زمانی، بر اساس میزان پایداری³² مدل می‌باشد. با توجه به شرایط پایداری مربوط به روشهای صریح جهت گسسته‌سازی و حل معادلات دیفرانسیل حاکم، نرم-افزار 3D FLOW - میزان حداکثر (Δt) را به عنوان گام زمانی جهت اجرای مدل، تعیین می‌نماید.

تعیین شرایط مرزی مدل‌های عددی

³⁰ Explicit

³¹ Implicit

³² Stability

²⁸ Mesh-block

²⁹ Mesh-plane

در مسائل دینامیک سیالات محاسباتی^{۳۳} شرایط مرزی شامل؛ ورودی، خروجی، دیوار، فشار ثابت، تقارن و متناوب می‌باشد. هر بلوک دارای شش وجه می‌باشد که باید نوع شرط مرزی در وجه این بلوک مشخص شود. برای تعریف شرایط مرزی در نرم-افزار، در زبانه Mesh-Cartesian زیرشاخه Boundaries انتخاب و شرایط مرزی در 6 وجه مکعب شبکه حل اعمال می‌شود. در مدل FLOW – 3D برای تعیین شرایط مرزی مسائل گوناگون، ده نوع شرط مرزی بر روی وجه‌های شبکه حل تعریف شده است. انتخاب شرایط مرزی در مدل سازی پژوهش حاضر، بشرح زیر می‌باشد:

الف - جهت مدل کردن سطح آزاد از شرط مرزی Zmax استفاده کرده و در زبانه Specified pressure زیرشاخه Stagnation را انتخاب نموده و برای گزینه Fluid Fraction عدد صفر انتخاب شده است.

ب- شرط مرزی Wall دقیقاً مشابه یک دیوار مجازی عمل می‌کند. لذا در مدل‌سازی انجام شده، برای تعریف شرایط مرزی Xmin و Zmin، Ymax و Ymin از شرط مرزی Wall استفاده شده است.

ج- جهت تطابق مدل عددی با مدل آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) بایستی سطح آب در کانال مدل‌سازی شده، روی عدد 0/8 متر ثابت گردد. در شرایط مرزی Xmax، عدد 0/8 متر در زبانه Fluid elevation برای نرم‌افزار تعریف شده و با این شرط، موج برگشتی وارد فضای مدل‌سازی نمی‌گردد. همچنین در بالای کانال، شرط مرزی فشار بدون وجود سیال (FLUID FRACTION =0) در نظر گرفته شده است.

مدل سازی حرکت جسم صلب داخل سیال

جهت تعریف جسم صلب متحرک در نرم‌افزار در قسمت معرفی فیزیک مدل^{۳۴} علاوه بر فعال نمودن ماژول‌های ویسکوزیته و آشفتگی و شتاب ثقل، بایستی مدل کمکی Moving and simple deforming objects فعال گردد. پس از انتخاب مدل کمکی، در کادر Moving object/fluid coupling بایستی یکی از گزینه‌های Explicit و Implicit انتخاب شود. جهت افزایش دقت نتایج و نیز مدل کردن مناسب موج حاصل از لغزش توده صلب، حالت Implicit انتخاب شده است. بعد از فعال کردن مدل کمکی فوق، نوبت به مرحله تعریف جسم صلب متحرک و شرایط حرکت آن می‌رسد.

اجسام صلب که دارای حرکت با شرایط مشابه خواهند بود، به‌عنوان بخش‌های مجزا^{۳۵} در زبانه Meshing & Geometry تعریف خواهند شد. در گزینه‌های مربوط به منوی کشویی Component properties جهت بیان خصوصیات بخش‌هایی که دارای حرکت هستند سه حالت Non-Moving، Coupled Motion و Prescribed Motion وجود دارد و به ترتیب بیانگر جسم بدون تحرک، حرکت با وضعیت مشخص و حرکت بصورت کوپل با سیال هستند. به دلیل استفاده از مدل دو فازی جسم - سیال، حرکت توده لغزشی صلب در این مدل‌سازی، با انتخاب گزینه Coupled Motion در نرم‌افزار انجام می‌گردد.

مدل سازی حرکت جسم دانه‌ای داخل سیال

رفتار ذرات جسم دانه‌ای مربوط به مدل‌سازی، مشابه رفتار ذرات رسوبی است و این ذرات قابلیت

³⁴ Physics

³⁵ Component

³³ Computational-Fluid-Dynamics_(CFD)

value در این صفحه، نرم افزار از اطلاعات پیش فرض استفاده می‌کند.

به دلیل سکون آب و اینکه در مدل‌سازی، دبی ورودی حاوی ذرات رسوبی جداگانه‌ای وجود ندارد، جهت تعیین مشخصات ذرات رسوبی مربوط به توده لغزشی دانه‌ای، عدد انتقال رسوب^{۳۹} معادل صفر در نظر گرفته شده است. نوع مصالح و مشخصات مربوط به هر یک از اجزای^{۴۰} جسم دانه‌ای قبل از شبیه‌سازی، تعیین می‌گردد. تعریف هندسه اجزای توده لغزشی دانه‌ای، در قسمت Geometry انجام می‌شود.

پس از تشکیل المان جدید، در زیرشاخه قسمت Component Type مشخصات هندسی و فیزیکی ذرات رسوب به نرم افزار معرفی شده و برخلاف توده لغزشی صلب که گزینه Solid فعال گردید، در حالت توده لغزشی دانه‌ای، گزینه Packed Sediment فعال شده است. میزان ذرات توده لغزشی دانه‌ای که به صورت ذرات رسوبی متراکم شده است معادل 100٪ تعیین می‌گردد. بنابراین توده لغزشی دانه‌ای در مدل‌سازی این تحقیق، توده متراکم دانه‌ای است و حین اجرای مدل، مطابق مشخصات هندسی و فیزیکی شامل: ابعاد هندسی، وزن، قطر و دانسیته، توده دانه‌ای مذکور روی سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

دلایل انتخاب مدل آشفتگی RNG

طبق مطالعات محققین گذشته و با توجه به هیدرودینامیک امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش در دیواره‌های مخازن سدها، جریان حاصله دارای کرنش سریع بوده و لزوماً این جریان بایستی بصورت آشفته، مدل‌سازی گردد. پس از حل مدل و

حرکت در آب را دارند، به گونه‌ایکه پس از لغزش توده دانه‌ای روی سطح شیب‌دار و رها شدن ذرات در آب، در کف بستر قرار می‌گیرند و بعضاً^{۳۸} هم از روی بستر بلند شده و مجدداً^{۳۶} روی بستر کانال قرار می‌گیرند. لذا به منظور تعریف جسم دانه‌ای متحرک به نرم‌افزار، در زبانه Model setup و در قسمت معرفی فیزیک مدل، علاوه بر فعال نمودن ماژول-های ویسکوزیته و آشفتگی، شتاب ثقل و دانسیته، بایستی قسمت Sediment scour فعال گردد. در حالت جسم دانه‌ای، توده دانه‌ها در ابتدای حرکت روی همدیگر قرار گرفته‌اند و پس از حرکت بر روی دیواره لغزشی، دانه‌ها از هم جدا می‌شوند.

برای مدل‌سازی حرکت جسم دانه‌ای متحرک داخل سیال، از ماژول انتقال رسوب استفاده شده است. رسوبات به دو صورت می‌توانند وجود داشته باشند: رسوبات معلق^{۳۶} و رسوبات متراکم^{۳۷}. رسوبات معلق دارای غلظت پایین بوده و با سیال حرکت می‌کنند. رسوبات متراکم در محل تعریف شده توسط کاربر هستند. جهت شبیه‌سازی انتقال رسوب در نرم‌افزار از مدل Meyer-Peter-Muller استفاده می‌شود. با فعال نمودن قسمت Sediment scour در نرم افزار، صفحه‌ای تحت عنوان Sediment Definition جهت معرفی مشخصات رسوب ظاهر می‌گردد. عدد شیلدز بحرانی در این بخش به نرم‌افزار معرفی و تعیین می‌گردد^{۳۸}. برای بررسی مسیر کانال موج، چنانچه عدد ذرات رسوبی از عدد شیلدز بحرانی کمتر باشد در این حالت ذرات رسوب از بستر کانال بلند می‌شوند و چنانچه عدد ذرات رسوبی از عدد شیلدز بحرانی بیشتر باشد آنگاه ذرات رسوب بر بستر کانال نشسته و رسوب گذاری انجام می‌گردد. با فعال نمودن گزینه Prescribed

³⁹ Entrainment Coefficient

⁴⁰ Component

³⁶ Suspended sediment

³⁷ Packed sediment

³⁸ Critical Shields number

گرفتن نتایج خروجی، گردابه‌های تولید شده، با کشیدن خطوط جریان^{۴۱} قابل مشاهده هستند. لذا جهت افزایش دقت نتایج و کاهش هزینه های محاسباتی و زمانی، از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است.

تنظیمات نهایی شبیه‌سازی و حل معادلات

در نرم‌افزار 3D – FLOW جهت تعریف شرایط فیزیکی حاکم بر مدل، زبان Physics مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انجام مدل سازی صحیح و منطبق بر شرایط واقعی، بایستی بر اساس معادلات و اصول فیزیکی حاکم بر پدیده مورد بررسی قرار گیرد. در بخش General مربوط به زبان Setup Model کلیاتی نظیر زمان شبیه‌سازی، سیستم آحاد مورد استفاده، تعداد و نوع سیالات مورد استفاده در شبیه‌سازی، تحلیل سطح آزاد، مشخصات فیزیکی نوع سیال یا سیالات موردنظر تنظیماتی برای سرعت و غیره به برنامه معرفی می‌شود. اولین و مهمترین پارامتر این بخش، Finish time می‌باشد و منظور از آن زمان پایان فرآیند تحلیل مدل موردنظر است. تحلیل مدل در گام زمانی صورت گرفته و سیکل-های تحلیل، در آن تکمیل و به پایان می‌رسد.

در برنامه 3D – FLOW انتخاب گام زمانی^{۴۲} توسط خود نرم‌افزار صورت می‌گیرد. البته زمان مورد نظر برای شبیه سازی را نیز می‌توان به مدل معرفی نمود. این زمان بیانگر زمانی است که پیش‌بینی می‌شود پدیده مورد نظر برای شبیه‌سازی در این زمان پایدار و یا کامل شود. با توجه به مطالعه آزمایشگاهی، مقدار گام زمانی جهت تحلیل مدل، 3 ثانیه انتخاب شده است. همچنین تعریف شرایط

تحلیل مسئله مثل و غیره، در زیر زبان General انجام می‌گردد.

تعریف شرایط تحلیلی، زمان اولیه آنالیز مدل، شرایط هندسی معادلات حاکم، معادلات فشار، مومنتوم و غیره، از دیگر مواردی است که در زیر زبان Numerics انجام می‌شود. در زبان Output نوع خروجی‌هایی که نیاز است و فواصل زمانی مورد نظر برای ذخیره آنها، به مدل معرفی می‌گردد. پس از اتمام مراحل تعریف مدل، برای اجرای شبیه‌سازی بایستی از گزینه Simulate استفاده نمود. شبیه‌سازی زمانی تکمیل می‌گردد که روند کار، همگرایی مناسبی داشته باشد. پس از اتمام شبیه‌سازی مرحله خروجی گرفتن از نتایج مدل سازی انجام می‌گردد.

روش حل مدل‌های عددی

جهت ساخت مدل از داده‌های اولیه، جزئیات و نتایج مربوط به مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) استفاده می‌گردد. حالات مدل‌های عددی، به ترتیب منطبق بر آزمایشات شماره 76 (توده صلب با زاویه شیب 45 درجه)^{۴۳}، 106 (توده دانه‌ای با زاویه شیب 45 درجه)^{۴۴} و 109 (توده دانه‌ای با زاویه شیب 60 درجه)^{۴۵} می‌باشد.

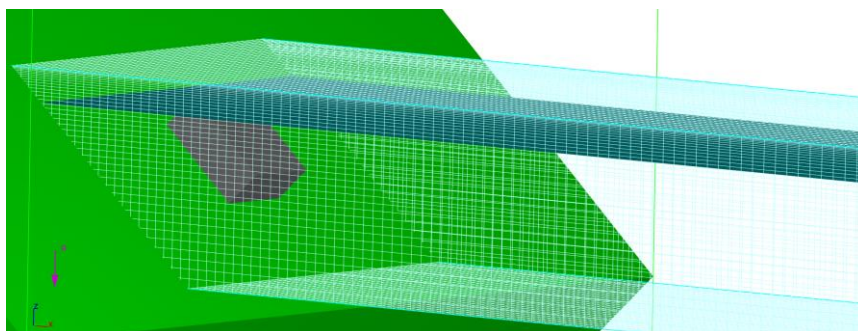
⁴³ Case76-R-B2a-45-12

⁴⁴ Case106-D-T1-45-11

⁴⁵ Case109-D-T1-60-11

⁴¹ Stream lines

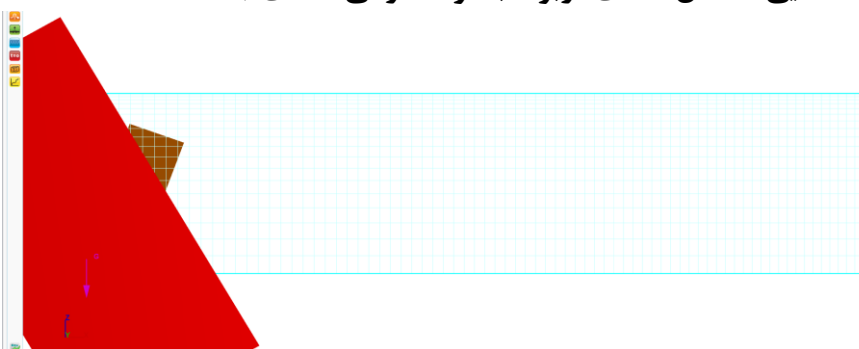
⁴² Time-Step



شکل 5- نمایی از مدل عددی مربوط به حالت توده لغزشی صلب (Case76-R-B2a-45-12)



شکل 6- نمایی از مدل عددی مربوط به توده لغزشی دانه‌ای (Case106-D-T1-45-11)



شکل 7- نمایی از مدل عددی مربوط به توده لغزشی دانه‌ای (Case109-D-T1-60-11)

شیب بستر 60 درجه^{۴۶} می‌باشد. محور افقی نشان- دهنده زمان و محور قائم میزان تغییرات گام زمانی را نشان می‌دهد. با توجه به حرکت موج و قرار گرفتن آن در داخل کانال که ناشی از لغزش توده است تغییرات گام زمانی، در زمان‌های مشخصی دچار جهش ناگهانی شده است.

در اشکال 10، 11 و 12 نتایج مدل‌سازی با مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط عطایی- آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) در سه حالت

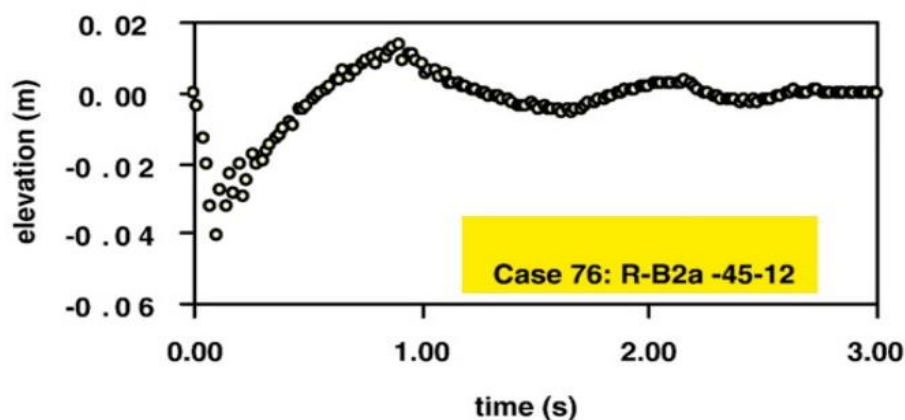
صحت سنجی نتایج حاصل از حل مدل‌ها

جهت بررسی دقت نتایج حاصل از حل مدل‌های عددی فوق، از نتایج مربوط به مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) استفاده شده است. به‌عنوان نمونه شکل 8 بیانگر نتایج آزمایشگاهی تست 76 مطالعه آزمایشگاهی می‌باشد. در شکل 9 نمودار تغییرات گام زمانی در 3 ثانیه شبیه‌سازی برای آزمایش شماره 109 (توده لغزشی دانه‌ای با زاویه

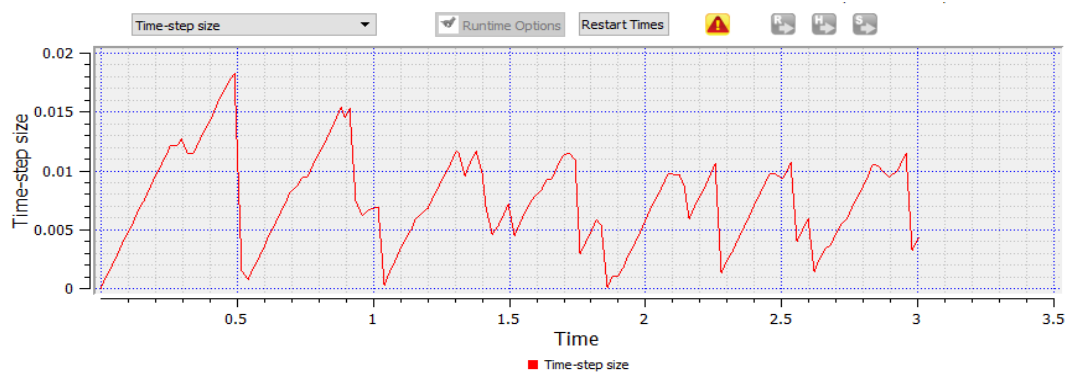
⁴⁶ Case109-D-T1-60-11

نشان‌دهنده داده‌های آزمایشگاهی و خطوط نارنجی نشان‌دهنده نتایج مدل‌سازی عددی می‌باشد.

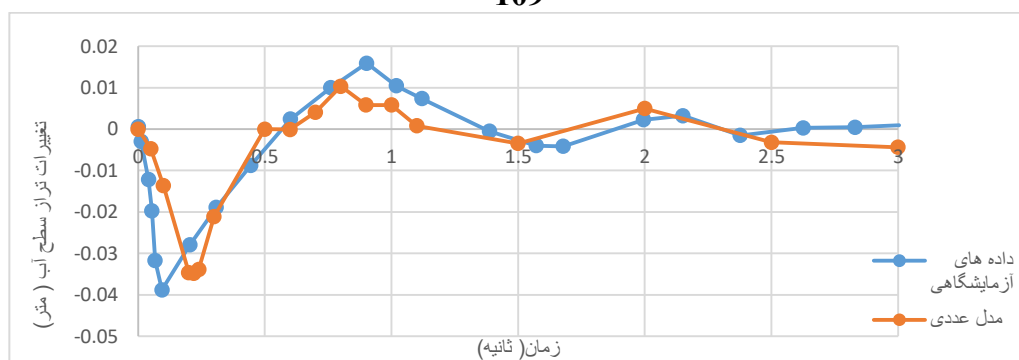
مختلف شامل آزمایش‌های 76، 106 و 109 مقایسه شده است. در این نمودارها خطوط آبی



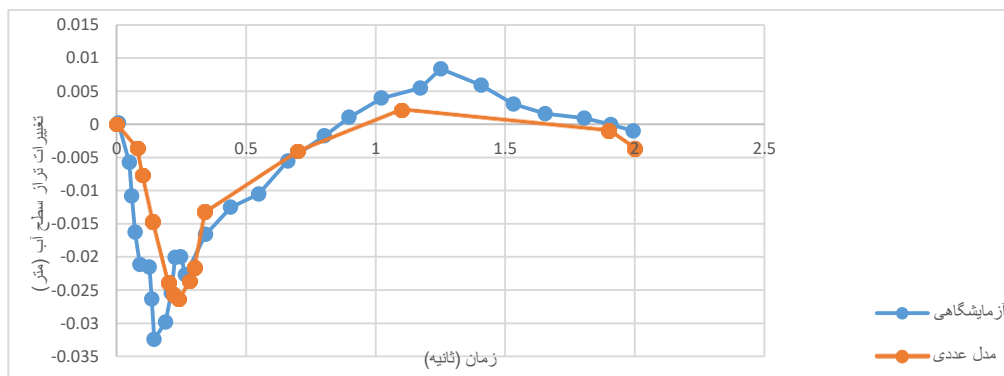
شکل 8- نمودار نتایج تست شماره 76 مطالعات آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008)



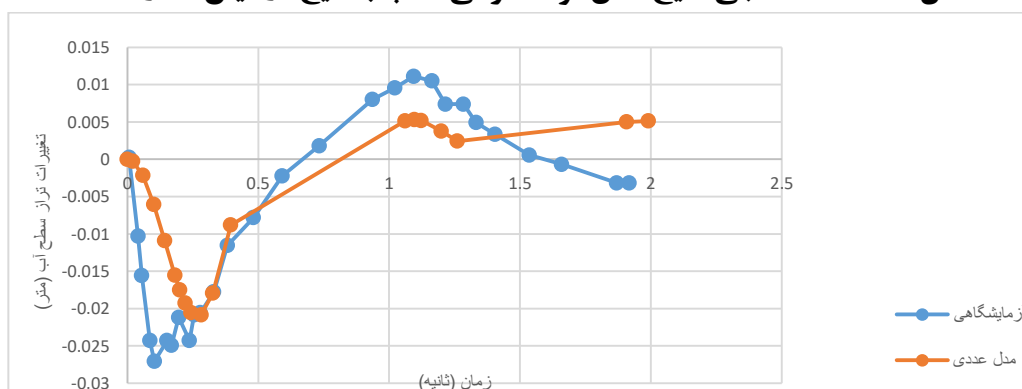
شکل 9- نمودار تغییرات گام زمانی طی 3 ثانیه شبیه‌سازی تحت شرایط آزمایش شماره 109



شکل 10- صحت‌سنجی نتایج مدل توده لغزشی صلب با نتایج آزمایش شماره 76



شکل 11- صحت سنجی نتایج مدل توده لغزشی صلب با نتایج آزمایش شماره 106



شکل 12- صحت سنجی نتایج مدل توده لغزشی صلب با نتایج آزمایش شماره 109

و نجفی جیلانی (2008) است و در اثر لغزش توده بر روی سطح شیبدار با زاویه 45 درجه، شکل موج ضربه‌ای حاصله در کانال، مشابه شکل موج ضربه‌ای مربوط به نتایج آزمایشگاهی است. مقایسه نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی، گویای درصد خطای در حد استاندارد در مدت زمان 2 ثانیه شبیه سازی عددی می باشد. بیشترین میزان خطا در زمان 1 تا 1/50 ثانیه شبیه سازی اتفاق می افتد و این موضوع می تواند ناشی از تغییرات پارامترهای جسم دانه‌ای در زمان لغزش و ایجاد موج ضربه‌ای باشد.

در شکل 13 نیز مدل ساخته شده منطبق بر آزمایش 109 در مطالعه آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) بوده و با لغزش توده بر روی سطح شیبدار با زاویه 60 درجه، شکل موج ضربه‌ای حاصله در داخل کانال، مشابه شکل موج ضربه‌ای مربوط به نتایج آزمایشگاهی است. مقادیر درصد خطاها در حد استاندارد است و

بحث و نتیجه گیری

در مدل سازی انجام شده در حالت بلوک لغزشی صلب و منطبق بر آزمایش 76 در مطالعه آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و نجفی جیلانی (2008) توده صلب بر روی صفحه لغزشی حرکت نموده و با ورود به کانال آب، موج ضربه‌ای تشکیل و در راستای کانال منتشر می گردد. حرکت این جسم بصورت کوپل با سیال انجام می گیرد. شکل موج ضربه‌ای حاصله مشابه شکل موج ضربه‌ای مربوط به نتایج آزمایشگاهی است. در شکل 11 مقایسه نتایج مدل سازی و نتایج آزمایشگاه، بیانگر درصد خطای در حد استاندارد در مدت زمان سه ثانیه شبیه سازی عددی انجام شده است. بیشترین درصد خطا در زمان‌های 0/9 ثانیه و زمان پایان شبیه سازی می باشد.

مدل ساخته شده در شکل 12 منطبق بر آزمایش 106 مطالعه آزمایشگاهی عطایی آشتیانی

نقطه بیشترین میزان خطا، در پایان زمان شبیه سازی و در انتهای کانال قرار گرفته است. علت اصلی این موضوع ناشی از هندسه بلوک دانه‌ای لغزشی، شیب 60 درجه ای صفحه لغزشی و شیوه مدل سازی بلوک لغزشی دانه‌ای می‌باشد

مراجع

آشتیانی، ب.ع. و جیلانی، ع.ن. 1387. شبیه سازی آزمایشگاهی امواج ضربه ای ناشی از رخداد لغزش دیواره در مخازن سدها. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران.
رامشه، س.ی. و آشتیانی، ب.ع. 1388. شبیه سازی عددی امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش دریاچه سد شفا رود ایران. هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، 1388.
رامشه، س.ی.، آشتیانی، ب.ع. و جیلانی، ع.ن. 1387. شبیه سازی عددی امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش‌های دریاچه سد ماکو در ایران. مجله مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، 1(3).
فاضلی، م. و عسگری، م. 1399. شبیه سازی عددی سه بعدی تولید امواج ناشی از زمین لغزش در مخازن سدها (مطالعه موردی سد سیاه بیشه). نشریه هیدرولیک.
فدافن، م.آ. و کرمانی، م.ح. 1392. مدل سازی دو بعدی امواج ناشی از لغزش صخره به مخزن سد. همایش مهندسی عمران و توسعه پایدار با محوریت کاهش خطر پذیری در بلایای طبیعی، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد.

An, Y., Wu, Q., Shi, C. and Liu, Q. 2016. Three-dimensional smoothed-particle hydrodynamics simulation of deformation characteristics in slope failure. *Géotechnique*, 66(8): 670-680.
Ataie-Ashtiani, B. and Jilani, A.N. 2008. Laboratory Investigations on Impulsive Waves Caused by under Water Landslide. *Coastal Engineering*, 55: 989-1004.
Ataie-Ashtiani, B. and Yavari-Ramshe, S. 2011. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs. *Landslides*, 8(4): 417-432.
Ataie-Ashtiani, B. and Jilani, A.N. 2007. A higher-order boussinesq-type model with moving bottom boundary: applications to submarine landslide tsunami waves. *international journal for numerical methods in fluids*, 53(6): 1019-1048.
Chen, G., Kharif, C., Zaleski, S. and Li, J. 1999. Two-dimensional Navier–Stokes simulation of breaking waves. *Physics of fluids*, 11(1): 121-133.
Grilli, S.T. and P. Watts, P. 2005. Tsunami generation by submarine mass failure, I: modeling, experimental Validation, and sensitivity analyses. *Journal of waterway port, coastal, and ocean engineering*, 131(6): 283-297.
Grilli, S.T., Vogelmann, S. and Watts, P. 2002. development of a 3D numerical wave tank for modeling tsunami generation by underwater landslides. *Engineering analysis with boundary elements*, 26(4): 301-313.
Lotfi, E., Safarzadeh, A. and H. Habibzadeh, H. 2013. Using moving object for investigation of various parameter in landslide impact waves, in 1th national conference of geotechnics. (in persian)
Monagan, J., Kos, A. and Issa, N. 2003. Fluid motion generated by impact, *ASCEJ. of water ways coastal and OC.Eng.* 129(6): 250-259.
Monaghan, J. and Kos, A. 2000. scott russell's wave generator. *physics of fluids*, 12(3): 630-622.

- Khoolosi, V., & Kabdaşlı, S. 2016. Numerical simulation of impulsive water waves generated by subaerial and submerged landslides incidents in dam reservoirs. *Civil Engineering Journal*, 2(10), 497-519.
- Viroulet, S., Cébron, D., Kimmoun, O. and Kharif, C. 2012. Evolution of water waves generated by subaerial solid landslide. In 27th International Workshop and Water Waves and Floating Bodies (IWWF).
- Watts, P., Grilli, S. T., Kirby, J. T., Fryer, G. J. and Tappin, D. R. 2003. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural hazards and earth system sciences*, 3(5): 391-402.