

«یادداشت تحقیقاتی»

شبیه‌سازی عددی توامان جریان موج سطح آزاد و جریان در محیط متخلخل با بکارگیری روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)

حبیبه شیبانی فرد¹، محمد ذونعمت کرمانی^{2*}

1- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

2- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

* zounemat@uk.ac.ir

چکیده- در این مقاله از روش عددی لاگرانژی و بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) برای شبیه‌سازی موج تنها بر روی محیط متخلخل استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان امواج با استفاده از این روش گسسته‌سازی شده و با الگوریتم دو گام جزئی حل می‌شوند. به منظور مدل‌سازی حرکت موج تنها روی محیط متخلخل با روش عددی SPH، با افزودن معادلات جریان در محیط متخلخل و اعمال شرایط مرزی بین فصل مشترک محیط متخلخل و غیر متخلخل (با در نظر گرفتن مرز به ارتفاع برابر با فاصله اولیه بین ذرات و اعمال معادلات پیوستگی مربوطه)، کد رایانه‌ای مساله توسط نویسندگان تهیه شد. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، نتایج حاصل با جواب‌های تحلیلی مدل‌سازی موج تنها و با استفاده از درصد میانگین خطای نسبی مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی موج تنها بر روی محیط متخلخل نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل عددی تهیه شده می‌باشد، به طوری که درصد میانگین خطای نسبی برای نتایج مدل‌سازی عددی نسبت به نتایج تئوری در محاسبه ارتفاع موج 3/54 درصد برآورد شده است.

کلیدواژگان: جریان سطح آزاد تراکم ناپذیر، هیدرودینامیک ذرات هموار شده، موج تنها، محیط متخلخل

1- مقدمه

دست یافت. مدل‌سازی پروفیل موج تنها بر روی محیط متخلخل (خاک) با روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار شده¹ موضوع مورد مطالعه در این تحقیق است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده یک روش ذره‌ای، لاگرانژی و بدون شبکه است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده به تعریف شبکه نیازی ندارد تا ارتباطی را بین

شناخت موج تنها به عنوان یک نمونه از امواج غیرخطی اهمیت زیادی در شناخت فرایندهای امواج در نواحی ساحلی دارد. بیشتر پدیده‌های حاکم در طبیعت بوسیله معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شوند که به ندرت می‌توان آنها را به صورت تحلیلی حل کرد. به همین دلیل با به کار بردن روش‌های عددی در حل معادلات حاکم می‌توان به جواب تقریبی مناسبی از این معادلات

¹ Smoothed particle hydrodynamics (SPH)

فرایندهای اساسی جریان شامل غیر خطی بودن (معادلات شیب ملایم)، پراکندگی فرکانس (معادلات آب کم عمق) و شکست موج (معادلات جریان پتانسیل) را محاسبه نمایند. در سال‌های اخیر مدل‌های کلی زیادی بر اساس معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده -رینولدزی (RANS) و همچنین مطالعات (Huang et al., 2003) توسعه داده شدند. Huang et al. (2003) مدل معادله ناویر-استوکس آرام غیر دائمی را با مدلی دیگر از معادله ناویر-استوکس برای حل جداگانه جریان بیرون و داخل محیط متخلخل کوپل کرد.

به منظور حل معادلات حاکم، آنها فرمول نیروی اصطکاکی پیشنهادی بوسیله Van Gent (1995) را برای جریان داخل محیط متخلخل به کار بردند و ضریب خطی استفاده شده را با نتایج آزمایشگاهی کالیبره کردند.

بر این اساس انواع مدل‌های عددی از قبیل مدل معادله شیب ملایم برای مسأله پخش موج بر روی شیب‌های متخلخل، مدل معادله آب کم عمق برای حرکت موج داخل سازه‌های متخلخل و مدل معادله نوع بوسینسک برای انتقال موج سرتاسر سازه‌های متخلخل توسعه پیدا کردند. مدل‌سازی بر اساس معادلات ناویر-استوکس قادر است جریان داخل محیط‌های متخلخل را با توجه به جزئیات جریان از جمله سرعت، فشار و آشفتگی محاسبه نماید.

Liu et al. (1999) شکست موج را در سرتاسر یک موج‌شکن متخلخل با حل نسخه قدیمی معادلات ناویر-استوکس (معادلات میانگین-رینولدز) برای جریان‌های میانگین بیرون موج‌شکن و معادلات میانگین خاص ناویر-استوکس برای جریان‌های متخلخل داخل موج‌شکن بررسی کردند. آشفتگی جریان‌های بیرونی توسط مدل $k-\epsilon$ و نیروی دراگ بعثت وجود اسکلت جامد به وسیله ترم‌های اصطکاکی خطی و غیرخطی مدل شده است. Hsu et al. (2002) تأثیرات آشفتگی در محیط متخلخل را در مقیاس کوچک در نظر گرفتند و معادلات مربوطه را با در نظر گرفتن مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و میزان افت به وسیله میانگین‌گیری حجمی معادلات $k-\epsilon$ استاندارد استخراج کردند. در کنار این یک مدل عددی غیرخطی کامل سه

ذرات در طول محاسبات ایجاد کند (Dalrymple et al., 2006, Liu et al., 2003 و Pengzhi et al., 2008).

این روش هم برای سیال تراکم پذیر و هم سیال تراکم‌ناپذیر کاربرد دارد. شبیه‌سازی جریان تراکم‌ناپذیر با دو روش زیر قابل اجرا است. در روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده تراکم پذیر ضعیف، سیال دارای تراکم پذیری کمی فرض شده و فشار سیال از یک معادله حالت تجربی محاسبه می‌گردد (Morris, Chorin et al., 1968). Morris et al., 1997 و Monaghan et al., 1994).

ولی در روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده تراکم‌ناپذیر^۱ سیال کاملاً تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و فشار و سرعت ذرات سیال از روش پروجکشن محاسبه می‌شوند (Lee et al. و Hu et al., 2007, Cummins et al., 1999) (2008).

یکی از مسائل امواج که اندرکنش موج با محیط متخلخل می‌باشد، هم از نظر علمی و هم کاربردی پدیده بسیار مهمی است. برای مثال در یک موج‌شکن ساحلی که از مواد متخلخل ساخته شده است، انرژی اضافی موج داخل سازه به دلیل اصطکاک جریان داخل محیط متخلخل می‌تواند مستهلک شود. مطالعات اولیه روی حرکت جریان داخل محیط متخلخل به قرن 19 بوسیله داری و دیگران بر می‌گردد.

از جمله (Sollitt et al., 1972) یکی از اولین مدل‌ها برای توصیف عبور جریان از محیط متخلخل را با اضافه کردن نیروهای مقاومتی غیر خطی و اینرسی به معادلات مومنتم توسعه دادند. از آن زمان مدل‌های توسعه یافته زیادی برای پیش بینی محدوده عظیمی از مسائل پخش موج از جمله: انتقال موج، انعکاس و اتلاف انرژی در عبور جریان از موج شکن‌های متخلخل پیشنهاد شد. این مدل‌ها بر اساس تئوری جریان پتانسیل (Sulisz, 1985; Yu et al., 1994) معادلات شیب ملایم (Rojanakamthorn et al., 1994) و معادلات آب کم عمق (Kobayashi et al., 1990; Wurjanto et al., 1993) بودند. متأسفانه ظرفیت پیش‌بینی این مدل‌ها محدود بوده و قادر نبودند که برخی

¹ Weak compressible smoothed particle hydrodynamics (WCSPH)

² Incompressible smoothed particle hydrodynamics (ISPH)

معادلات ناویر-استوکس در نظر گرفته می‌شود. مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم ناپذیر به وسیله نفوذ آب در محیط متخلخل و نشت موج تنها و همچنین موج ایجاد شده از شکست سد بر روی محیط متخلخل صحت‌سنجی شده است.

2- معادلات حاکم بر جریان آب

2-1- قانون بقای جرم (معمارزاده، 1390)

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

در فرمول (1)، ρ چگالی سیال، t زمان و u سرعت می‌باشد.

2-2- قانون بقای مقدار حرکت

با استفاده از روابط مربوط به تنش سیال و فرض تراکم ناپذیر بودن سیال، معادله بقای مقدار حرکت به معادله ناویر-استوکس منجر می‌شود (معمارزاده، 1390):

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u + f_b \quad (2)$$

μ بیانگر لزجت دینامیکی و f_b بیانگر نیروی خارجی وارد بر آب است که در اینجا نیروی ثقل است.

از سمت راست جمله اول بیانگر گرادین فشار، جمله دوم تأثیر لزجت و جمله سوم نشان‌دهنده تأثیر نیروی خارجی وارد بر آب است و از جنس شتاب می‌باشد (عطایی آشتیانی و همکاران، 1386).

3- مروری کلی بر فرمول‌بندی روش

هیدرودینامیک ذرات هموار شده

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده از تابع هموار برای درون‌یابی انتگرالی محدود برای تقریب تابع استفاده می‌شود (معمارزاده، 1390):

$$f(r) = \int_{\Omega} f(r_0) \hat{w}(|r-r_0|, h) dr \quad (3)$$

در معادله (3)، \hat{w} تابع درون‌یابی کرنل، r بردار موقعیت، h طول هموار، r_0 بردار موقعیت ذره مرکزی و Ω ناحیه تأثیر اطراف نقطه مورد نظر است. به منظور پیدا کردن ذرات موجود در ناحیه تأثیر هر ذره مرکزی، Monaghan

بعدی بوسیله Golshani et al. (2003) برای جریان شامل موج و حرکت ذره آب داخل یک سازه نفوذپذیر عمودی استفاده شد، اما به بار محاسباتی زیادی نیاز بود.

Garcia et al. (2004) و Lara et al. (2006) مدل عددی Liu et al. (1999) را برای تخمین اندرکنش موج منظم و غیر منظم با یک موج‌شکن نفوذپذیر کم ارتفاع به کار بردند و محاسباتشان را بوسیله آزمایش‌های با شرایط مرزی مختلف برای موج و طراحی‌های مختلف برای موج‌شکن صحت‌سنجی کردند.

Karunaratna et al. (2006) مدل‌های عددی را برای مطالعه نشت موج سرتاسر بستر دریای متخلخل توسعه دادند.

Ren et al. (2014) اندرکنش موج را با سازه‌های متخلخل بررسی نمودند و برای مدل‌سازی جریان بیرون محیط متخلخل و داخل محیط متخلخل به ترتیب از معادلات ناویر-استوکس میانگین با به کارگیری مدل آشفتنگی گردابه‌های بزرگ (LES) و معادلات ناویر-استوکس با اضافه کردن جمله اصطکاک استفاده کردند. ایشان همچنین برای مدل‌سازی مرز دو محیط از میانگین‌گیری معادلات دو طرف استفاده کردند.

Gui et al. (2015) اندرکنش موج با سازه متخلخل را با استفاده از مدل Huang et al. (2003) با حل جداگانه معادلات بیرون و داخل محیط متخلخل به مانند مقاله حاضر مورد بررسی قرار دادند و همچنین از یک روش ابتکاری (مرز بین دو محیط بجای یک خط یک محدوده به عرض 4 برابر فاصله اولیه ذرات در نظر گرفته شد و فشار ذرات موجود در این لایه با میانگین‌گیری از فشار ذرات موجود در همین لایه که از معادله پواسون فشار محاسبه شدند، تصحیح میشود و در نهایت سرعت و مکان ذرات موجود در این لایه به روز می‌شوند) برای مدل‌سازی مرز بین محیط آب و محیط متخلخل (سازه) استفاده کردند.

در این مقاله مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم‌ناپذیر معادلات جریان غیردائمی ناویر-استوکس را برای جریان خارج و داخل محیط متخلخل حل می‌کند. حضور محیط متخلخل با نیروهای اصطکاکی اضافی در

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u}\right)_i = \sum_j \frac{4m_j (\mu_i + \mu_j) \bar{r}_{ij} \cdot \nabla_i \bar{w}_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^2 (|r_{ij}|^2 + \eta^2)} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \quad (9)$$

η در معادله بالا کمیتی است برای جلوگیری از صفر شدن مخرج و برابر با $0.1h$ در نظر گرفته شده است (Liu et al., 2003)

در این مرحله شرایط تراکم ناپذیری ارضاء نشده و در نتیجه ضرورت ایجاد یک مرحله محاسبات دیگر (مرحله تصحیح) مطرح می‌شود.

در مرحله تصحیح، فشار ذرات سیال با حل دستگاه معادلات خطی تشکیل شده (معادله 10) قابل محاسبه می‌باشند. با توجه به مقدار فشار محاسبه شده، می‌توان Δu_{**} را محاسبه کرد و در نتیجه سرعت u_{t+1} و همچنین مکان ذرات r_{t+1} با توجه به مرحله اولیه و پیش-بینی، تصحیح می‌شوند (معادلات 12 و 13) (معمارزاده، 1390).

$$\Delta u_{**} = \frac{-1}{\rho_*} \nabla p_{t+1} \Delta t \quad (10)$$

$$\Delta \left(\frac{1}{\rho_*} \nabla p_{t+1} \right) = \frac{\rho_0 - \rho_*}{\rho_* \Delta t^2} \quad (11)$$

$$u_{t+1} = u_* + \Delta u_{**} \quad (12)$$

$$r_{t+1} = r_t + \frac{u_{t+1} + u_t}{2} \quad (13)$$

4- مدل سازی موج بر روی محیط متخلخل

4-1- معادلات حاکم در مدل هیدرودینامیک ذرات

هموار شده تراکم ناپذیر برای جریان متخلخل

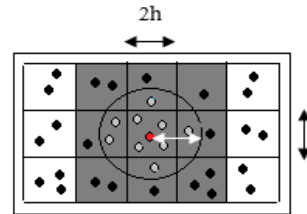
بر طبق نظر هانگ و همکاران (2003) جریان بیرون از پوشش متخلخل آرام فرض می‌شود و بوسیله معادلات ناویر-استوکس دو بعدی (14) و (15) حل می‌شود (Huang et al., 2003).

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u}_w = 0 \quad (14)$$

$$\frac{D\mathbf{u}_w}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_w \quad (15)$$

زیر نویس w مربوط به سیال و p مربوط به محیط متخلخل است. جریان در محیط متخلخل توسط معادله ناویر-

(2000) روشی را با نام لسیت‌های مرتبط شده^۱ معرفی کرد (شکل 1).



شکل 1 افزاز دامنه محاسبات به مربع‌هایی به ابعاد $2h$ برای پیدا کردن ذرات واقع در ناحیه تأثیر ذره مرکزی

3-1- الگوریتم دو گام جزئی برای معادلات حاکم در

روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده از الگوریتم دو گام جزئی که شامل دو گام پیش‌بینی و تصحیح می‌باشد، برای محاسبات استفاده می‌شود.

در ابتدا مختصات و سرعت ذرات سیال با توجه به شرایط اولیه تنظیم و با استفاده از معادله (4) جرم تمامی ذرات تعیین می‌شود. همچنین چگالی ذرات با معادله (5) محاسبه شده و در آن گام زمانی استفاده می‌شود (معمارزاده، 1390).

$$m_i = \frac{\rho_0}{\sum_j \bar{w}(|r_i - r_j|, h)} \quad (4)$$

$$\rho_i = \sum_j m_j \bar{w}(|r_i - r_j|, h) \quad (5)$$

در فرمول‌های فوق m بیانگر جرم، \bar{w} تابع هموار و h طول هموار است. همچنین اندیس‌های i و j به ترتیب مربوط به ذره مرکزی و ذرات موجود در دامنه تأثیر ذره مرکزی هستند.

در مرحله پیش‌بینی، سرعت u_* و مکان ذرات r_* محاسبه می‌شود (معادلات 6 و 7).

$$u_* = u_t + \Delta u_* \quad (6)$$

$$r_* = r_t + u_* \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta u_* = \left(g + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u \right) \Delta t \quad (8)$$

^۱ linked list

4-2-3-3- شرایط مرزی فصل مشترک بین آب و محیط متخلخل (خاک)

به منظور اعمال شرایط مرزی بین محیط متخلخل و بیرون در دو بعد، معادلات پیوستگی زیر اعمال می‌شوند (معمارزاده، 1390):

$$u_w = n_w u_p \quad (22)$$

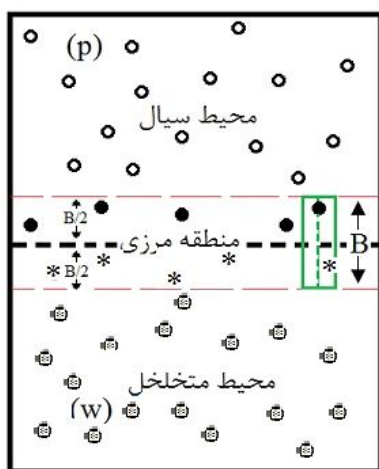
$$v_w = n_w v_p \quad (23)$$

$$(-p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y})_w = (-p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y})_p \quad (24)$$

u و v سرعت جریان در جهات افقی و عمودی، p فشار، μ لزجت دینامیکی و n_w تخلخل محیط متخلخل (خاک) است. در مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم ناپذیر برای جریان‌های متخلخل معادلات جریان برای دو قسمت متخلخل و غیر متخلخل حل می‌شوند و معادلات پیوستگی در مرز بین این دو محیط اعمال می‌شوند (Huang et al., 2003).

4-2-3-1- نحوه پیاده سازی شرایط مرزی فصل مشترک بین آب و محیط متخلخل (خاک)

در مقاله حاضر به منظور اعمال شرایط مرزی فصل مشترک بین دو محیط، ابتدا یک لایه به عرض مشخص $(B=dr)$ فاصله اولیه بین ذرات است که در این تحقیق 0/01 متر در نظر گرفته شده است) به طوری که نیمی از این عرض در محیط متخلخل $(B/2)$ (خاک) و نیمی دیگر در بیرون محیط متخلخل $(B/2)$ (آب) قرار گیرد (شکل 2).



شکل 2 اعمال شرایط مرزی بین محیط سیال (آب، دایره‌های سیاه تو خالی) و محیط متخلخل (خاک، دایره‌های هاشور خورده)

استوکس زیر حل می‌شود (Huang et al., 2003):

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot u_p = 0 \quad (16)$$

$$\frac{Du_p}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \nu \nabla^2 u_p - \frac{\nu n_w}{k_p} u_p - \frac{c_f n_w^2}{\sqrt{k_p}} u_p |u_p| \quad (17)$$

n_w تخلخل، k_p نفوذپذیری ذاتی (معادله (18)) و c_f (معادله (19)) ضریب اصطکاک غیرخطی است. دو جمله سمت راست معادله (17)، نیروهای اصطکاک وارد بر جریان توسط اسکلت جامد خاک هستند (Huang et al., 2003).

$$k_p = 1.643 \times 10^{-7} \left[\frac{d(\text{mm})}{d_0} \right]^{1.57} \frac{n_w^3}{(1-n_w)^2} \quad (18)$$

$$c_f = 100 \left[d(m) \left(\frac{n_w}{k_p} \right)^{1/2} \right]^{-1.5} \quad (19)$$

در معادله (19)، d قطر ذرات محیط متخلخل است.

4-2-4- اعمال شرایط مرزی

4-2-4-1- مدل سازی دیواره صلب

برای مدل سازی دیواره صلب از یک ردیف ذره با موقعیت ثابت استفاده می‌شود. به منظور در نظر گرفته نشدن ذرات دیواره به عنوان ذرات سطح آزاد، دو ردیف ذره مجازی به طور ثابت قرار داده شده‌اند. برای شناسایی ذرات سطح آزاد از بررسی شرط زیر برای تمامی ذرات استفاده می‌شود (معمارزاده، 1390):

$$\rho_* < \beta \times \rho_0 \quad (20)$$

β پارامتر سطح آزاد است که با توجه به نتایج آزمایش‌های عددی 0/98 در نظر گرفته شده است و ρ_* چگالی ذرات در گام پیش‌بینی می‌باشد (Akbari et al., 2013).

4-2-2-4- محدودیت گام زمانی

در مدل حاضر اندازه گام زمانی، توسط عدد کورانت کنترل می‌گردد (معمارزاده، 1390):

$$\Delta t \leq 0.1 \frac{dr}{u_{\max}} \quad (21)$$

dr فاصله اولیه بین ذرات و u_{\max} سرعت حداکثر در هر گام زمانی است (Ataie-Ashtiani et al., 2008).

گام پیش‌بینی باید با پیدا کردن ذره معادل هر ذره و اعمال معادله (26) برای ذرات موجود در این مرز اصلاح شود.

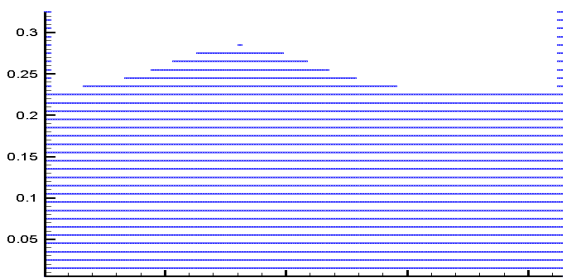
5- پیاده‌سازی مدل عددی

5-1- صحت‌سنجی مدل عددی

جواب تحلیلی برای حرکت موج تنها در عمق یکنواخت که از معادله بوسینسک به دست می‌آید، به صورت معادله (25) ارائه شده است (Lo et al., 2002).

$$\eta(x,t) = a \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3a}{4d^3}} (x - ct) \right] \quad (25)$$

در معادله بالا a دامنه موج، d عمق آب، $c = \sqrt{g(d+a)}$ سرعت موج تنها و t زمان است. در این شبه‌سازی موج تنها دارای دامنه 0/06 متر بوده و عمق آب 0/2 متر است.



شکل 3 هندسه اولیه مسأله حرکت موج تنها بر روی محیط صلب و متخلخل

فاصله اولیه بین ذرات 0/01 متر و تعداد کل ذرات 5200 ذره می‌باشد. سرعت افقی کلیه ذرات به جز ذرات واقع در پروفیل موج و زیر این پروفیل صفر هستند. ذرات واقع در پروفیل موج و زیر آن دارای سرعت اولیه هستند (معادله 26).

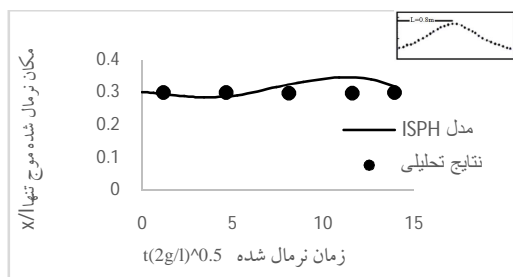
$$u = \eta \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (26)$$

در رابطه (26)، g شتاب ثقل برابر با 9/8 m/s²، d عمق ثابت آب برابر با 0/2 متر و η طبق رابطه (27) مقدار ارتفاع موج است. چگالی آب و لزجت دینامیکی ذرات آب به ترتیب مقدار 1000 kg/m³ و 0/001 N.s/m² هستند. گام زمانی از طریق رابطه کورانت کنترل می‌شود و معادل 0/001 ثانیه که این رابطه را ارضاء می‌کند، قرار گرفته

شایان ذکر است که به منظور حساسیت‌سنجی عرض لایه فصل مشترک، مقادیر دیگری هم مورد مطالعه قرار گرفت (به‌عنوان مثال $B=dr/2$). اما تحلیل نتایج، عرض ذکر شده را مناسب‌ترین مقدار برای مدل‌سازی مشخص ساخت.

در هر گام زمانی در مرحله پیش‌بینی، سرعت ذرات مانند آنچه در بخش 1-3 توضیح داده شد، برای قسمت بیرون از محیط متخلخل (محیط سیال w در شکل 2) محاسبه می‌شود و برای داخل محیط متخلخل (محیط متخلخل p در شکل 2) معادلات (16 و 17) به جای معادلات (14 و 15) با همان شیوه حل می‌شوند. در نهایت سرعت پیش‌بینی ذرات برای محیط آب و محیط خاک به دست می‌آید. پس از آن در یک گام اصلاحی، سرعت ذراتی که در لایه B قرار گرفته‌اند، با معادلات پیوستگی (22) و (23) اصلاح می‌شود. به منظور اعمال شرایط مرزی و تصحیح سرعت در مرز دو محیط با معادلات پیوستگی، سرعت‌های پیش‌بینی برای محیط متخلخل موجود در لایه y مرزی که در عرض $B/2$ پایینی واقع هستند (u_p)، با استفاده از معادلات پیوستگی (22) و (23) اصلاح می‌شوند. به‌گونه‌ای که با پیدا کردن ذره معادل برای هر ذره در قسمت $B/2$ پایینی و اعمال روابط پیوستگی (ضرب در تخلخل خاک)، سرعت‌های ذرات موجود در لایه $B/2$ بالایی (محیط آب- u_w) در مرحله پیش‌بینی اصلاح می‌شوند (در محدوده مستطیل سبزرنگ شکل 2، ذره با شکل ستاره برای ذره مشکی توپر ذره معادل می‌باشد).

شایان ذکر است که برای پیدا کردن ذره معادل هر ذره موجود در لایه $B/2$ بالایی که در $B/2$ پایینی هستند، با استفاده از یک ترفند در کدنویسی مربوطه ذراتی جستجو می‌شوند که در زیر این ذرات و در لایه $B/2$ پایینی قرار داشته باشند (یا $dr/4$ در چپ و راست آن ذره و در لایه $B/2$ زیری باشند). طول این مستطیل برابر B و عرض آن در این مطالعه متغیر فرض شده، ولی در نهایت با مقایسه‌های انجام شده توسط نویسندگان، $dr/2$ در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه چگالی ذرات و مکان ذرات در مرحله پیش‌بینی، با حل معادله پواسون و حل ماتریس متقارن ایجاد شده، فشار ذرات محاسبه می‌شود، اما فشار ذرات موجود در لایه مرزی (B) مانند سرعت‌ها در



شکل 6 نمودار بی بعد شده زمان در برابر مکان موج تنها

2-5- مدل‌سازی حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل

در مدل‌سازی موج تنها با روش ذکر شده بر روی محیط متخلخل (خاک)، فاصله اولیه بین ذرات 0/01 متر و تعداد کل ذرات در نظر گرفته شده 6259 ذره می‌باشد. سرعت کلیه ذرات، شتاب ثقل، عمق آب، η ، چگالی، لزجت و گام زمانی همانند بخش 1-5 اعمال می‌گردند.

تخلخل فرض شده (n_p) مقدار 0/39 و قطر دانه‌های محیط متخلخل مقدار 0/55 cm است. با توجه به این مقادیر نفوذپذیری ذاتی (k_p) و ضریب اصطکاک غیرخطی (c_f) با توجه به معادلات (18) و (19) مقادیر $k_p = 0.102 \times 10^{-7} m^2$ و $c_f = 0.51$ محاسبه می‌شوند.

میزان ارتفاع موج تنها بر روی محیط متخلخل از رابطه (27) قابل پیش‌بینی است (Shao, 2010).

$$H = \frac{H_i}{1 + c_s(H_i/h_0)(x/h_0)} \quad (27)$$

$$c_s = 0.4 \left(\frac{k}{h}\right) \left(\frac{h_p}{h_0}\right) \quad (28-الف)$$

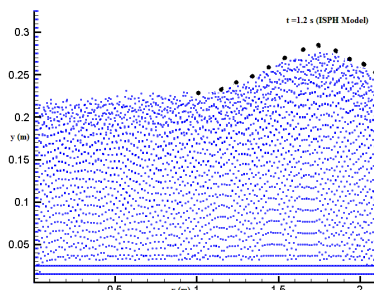
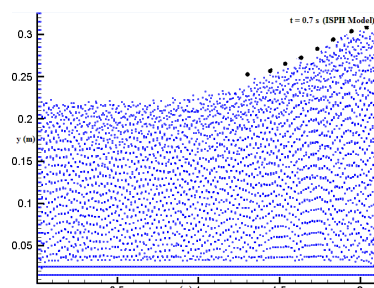
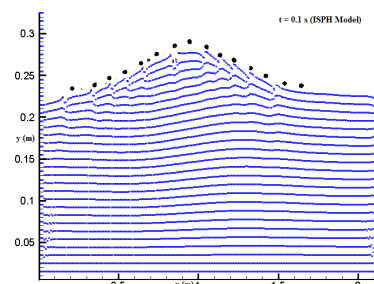
$$c_0 = \sqrt{gh_0} (1 + H_i/2h_0) \quad (28-ب)$$

k_i هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل است و با فرمول $k_p g/v$ محاسبه می‌شود. همچنین H_i ارتفاع اولیه موج برابر با 0/06 متر، h_p و h_0 به ترتیب ارتفاع ثابت آب و ضخامت خاک، برابر با 0/2 متر هستند و x مکان می‌باشد (Huang et al, 2003).

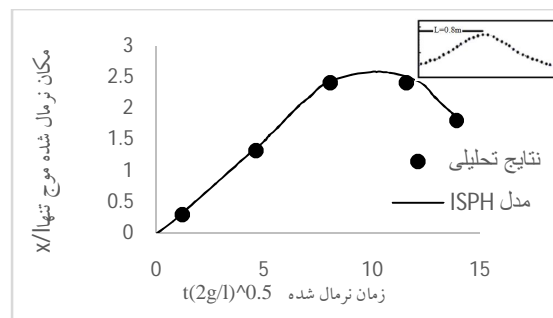
نتایج مدل‌سازی حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل و مقایسه آن با حرکت موج تنها بر روی محیط صلب در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 7 مشخص می‌شود، اختلاف بین دو پروفیل، میزان نفوذ را

است. (Shao, 2010).

نتایج مقایسه مدل‌سازی موج تنها روی محیط صلب و نتایج تحلیلی حاصل از معادله 25 در شکل 4 برای سه زمان آورده شده است. نمودارهای بی بعد شده 5 و 6 در ادامه آمده‌اند.

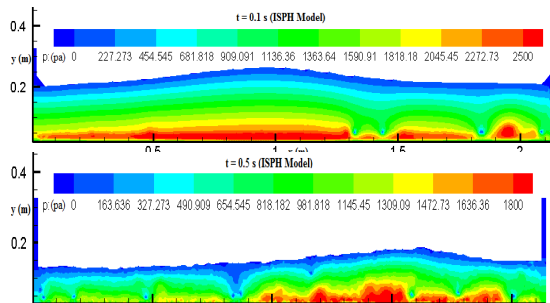


شکل 4 مقایسه بین پروفیل‌های شبیه‌سازی شده موج تنها با مدل ISPH (نقاط کوچک) و نتایج تحلیلی (نقاط درشت) در زمان‌های 0/1، 0/7 و 1/2 ثانیه

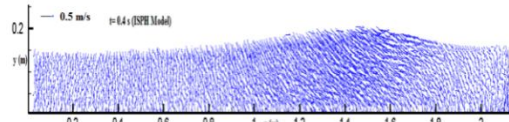


شکل 5 نمودار بی بعد شده زمان در برابر ارتفاع موج تنها

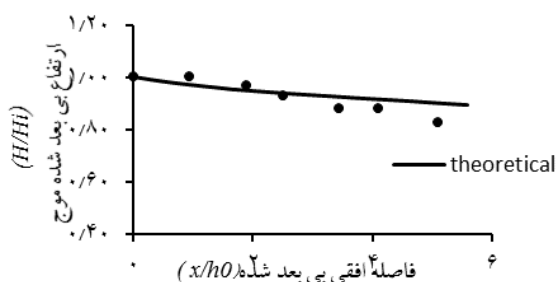
در خاک، فشار آب به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شکل 9 بردارهای سرعت برای حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل در زمان 0/4 ثانیه را نشان می‌دهد. شکل 10 نشان می‌دهد که مدل تهیه شده مسأله پخش موج روی محیط متخلخل را به خوبی مدل‌سازی کرده است. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی تهیه شده از نتایج فرمول تئوری (27) استفاده شده است و پس از مقایسه نتایج مدل عددی و نتایج فرمول تئوری، درصد میانگین خطای نسبی در شبیه‌سازی ارتفاع موج در این مسأله مقدار 3/54 درصد به دست آمده است.



شکل 8 میدان میانگین‌گیری شده فشار برای مسأله حرکت موج تنها روی محیط متخلخل در زمان‌های 0/1 و 0/7 ثانیه



شکل 9 بردارهای سرعت برای حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل در زمان 0/4 ثانیه

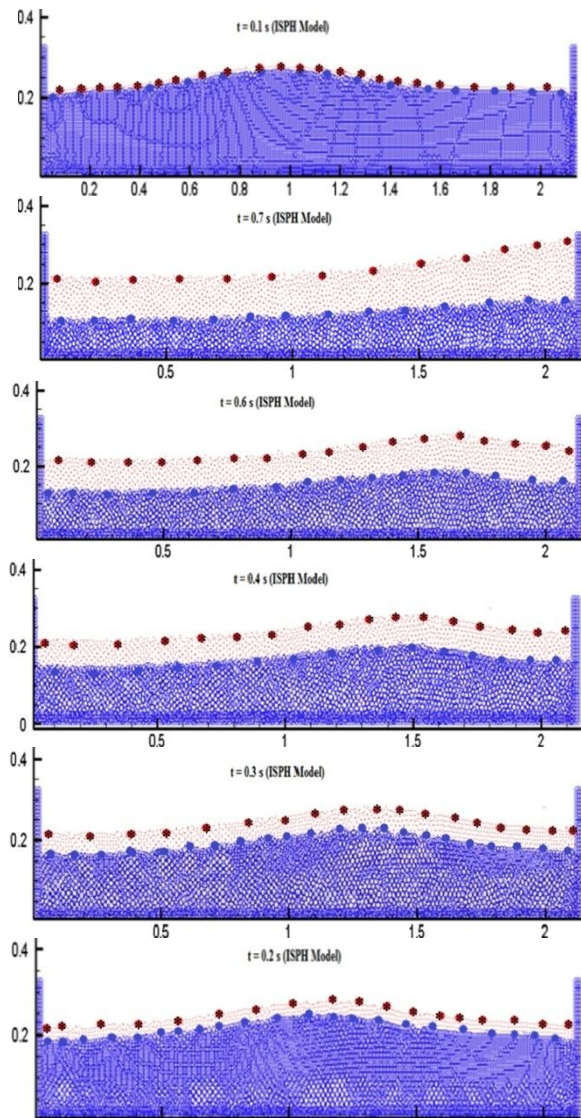


شکل 10 نمودار ارتفاع بی بعد شده موج تنها بر روی محیط متخلخل برای نتایج تئوری و نتایج مدل حاضر.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار

در هر زمان مشخص می‌کند. ارتفاع موج منتقل شده روی خاک از فرمول تئوری (27) محاسبه شده و با ارتفاع موج مدل‌سازی شده با روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار شده در نمودار بی بعد شده 10 مقایسه شده‌اند.



شکل 7 پروفیل حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل (ذرات آبی رنگ) و مقایسه با پروفیل موج تنها بر روی محیط صلب (ذرات قرمز رنگ)، جهت وضوح سطح موج با دایره‌های تو پر بزرگتر نشان داده شده است

خطوط هم فشار شکل 8 نشان می‌دهند که در اکثر زمان‌ها، فشار هیدرواستاتیکی از فشار محاسبه شده از مدل عددی کمتر است. این نشان می‌دهد که با نفوذ آب

t	مقدار کمیت مورد نظر در زمان t
*	مقدار کمیت مورد نظر در مرحله پیش‌بینی
0	مقدار اولیه کمیت مورد نظر
i	نماد ذره مرکزی
j	نماد هر ذره موجود در ناحیه تأثیر ذره مرکزی
w	مقدار کمیت در محیط آب
p	مقدار کمیت در محیط خاک
علائم یونانی	
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
μ	لزجت دینامیکی سیال (N.s/m^2)
δ	تابع دلتای دیراک
Ω	دامنه تأثیر ذره مرکزی
η	ارتفاع موج

8- منابع

- عطایی آشتیانی، ب. و بهشتی، ع. (1386). مکانیک امواج آب. جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.
- معمارزاده، ر. (1390). مدل‌سازی عددی موج با روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده SPH. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- Akbari, H. and Namin, M.M. (2013). "Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures". J. Coastal Engineering. 74, pp. 59-73.
- Ataie-Ashtiani, B. Shobeiry, G. and Farhadi, L. (2008). "Modified Incompressible SPH method for simulating free surface problems". Fluid Dynamic Research, Vol. 40, pp. 637-661.
- Chorin, A.J. (1968). "Numerical solution of the Navier-Stokes equations". J. Mathematics of computation. 22, pp. 745-762.
- Cummins, S.J. and Rudman, M. (1999). "An SPH projection method," J. Computational Physics. 152, pp. 584-607.
- Dalrymple, R. and Rogers, B. (2006). "Numerical modeling of water waves with the SPH method". J. Coastal Engineering. 53, pp. 141-147.
- Garcia, N. Lara, J. and Losada, I. (2004). "2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters" J. Coastal Engineering. 51, pp. 991-1020.
- Golshani, A. Mizutani, N. Hur, D.S. and Shimizu, H. (2003). "Three-dimensional analysis of

شده به منظور شبیه‌سازی حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل استفاده شد. در این تحقیق با در نظر گرفتن دو نوع معادله یکی برای بیرون محیط متخلخل و یکی برای محیط متخلخل و با در نظر گرفتن شرایط مرزی در مرز بین دو محیط متخلخل و غیر متخلخل و اصلاح سرعت و فشار در این مرز، مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم ناپذیر برای مدل‌سازی حرکت ذرات (ذرات آب) در محیط متخلخل تهیه شد. معادلات جریان در محیط متخلخل با در نظر گرفتن دو ترم اصطکاکی که ناشی از اصطکاک ذرات آب در محیط خاک می‌باشد، در نظر گرفته شدند. با توجه به ابعاد مسأله، مرز بین محیط متخلخل و محیط غیر متخلخل مشخص شد. به طوری که سرعت ذرات پس از عبور از منطقه آب و ورود به محیط خاک با معادلات ناویر-استوکس مربوط به محیط متخلخل حل شدند و با در نظر گرفتن شرایط مرزی در بین این دو مرز (آب و خاک)، سرعت و فشار ذرات اصلاح گردید. شبیه‌سازی فصل مشترک بین آب و محیط خاک (متخلخل) با استفاده از رهیافت پیشنهادی در مدل‌سازی این مرز توسط Shao et al. (2010) صورت پذیرفت. همچنین پس از مدل‌سازی حرکت موج تنها بر روی محیط متخلخل و مقایسه نتایج با نتایج تئوری، کارایی مدل تهیه شده در مدل‌سازی مسائل با محیط متخلخل تأیید شد. قابل ذکر است که می‌توان با توسعه کد عددی تهیه شده در نرم‌افزار برنامه‌نویسی فرترن، از این برنامه برای مطالعات آتی در زمینه نفوذ و برخورد امواج با سازه‌های متخلخل استفاده کرد.

7- فهرست علائم

a	دامنه موج
c_f	ضریب اصطکاک غیرخطی
d	عمق آب
f_b	نیروی خارجی
h	طول هموار
k_p	نفوذپذیری ذاتی
n_w	تخلخل محیط متخلخل
u	سرعت
\hat{w}	تابع هموار
	زیرنویس‌ها

- with porous structures" J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 125, pp. 322-330.
- Lo, E.Y.M. and Shao, S. (2002). "Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method," Applied Ocean Research. Vol. 24, pp. 275-286.
- Monaghan, J.J. (1994). "Simulating free surface flows with SPH". J. Computational Physics. 110, pp. 399-406.
- Morris, J.P. Fox, P.J. and Zhu, Y. (1997). "Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH". J. Computational Physics. 136, pp. 214-226.
- Monaghan, J.J. (2000). "SPH without a tensile instability" J. Computational Physics. 159, pp. 290-311.
- Pengzhi, L. (2008). *Numerical modeling of water waves*. ed: Taylor & Francis, New York,.
- Ren, B. Wen, H. Dong, P. and Wang, Y. (2014). "Numerical simulation of wave interaction with porous structures using an improved smoothed particle hydrodynamic method" J. Coastal Engineering. 88, pp. 88-100.
- Shao, S. and Lo, E.Y. (2003). "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface". Advances in Water Resources . 26, pp. 787-800.
- Shao, S. (2010). "Incompressible SPH flow model for wave interactions with porous media" J. Coastal Engineering. 57, pp. 304-316.
- Sollitt, C.K. Cross I, R.H. (1976). "Wave Reflection and transmission at permeable breakwaters". Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge, Dept. of Civil Engineering.
- Sulisz, W. (1985). "Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross-section". Coastal Engineering, 9(4), pp. 371-380.
- nonlinear interaction between water waves and vertical permeable breakwater" J. Coastal Engineering. 45, pp. 1-28.
- Gui, Q. Dong, P. Shao, S. and Chen, Y. (2015). "Incompressible SPH simulation of wave interaction with porous structure" J. Ocean Engineering. 110, pp. 126-139.
- Hsu, T. Sakakiyama, J.T. and Liu, F. (2002). "A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater" J. Coastal Engineering. 46, pp. 25-50.
- Huang, C. Chang, H.H. and Hwung, H. (2003). "Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a submerged breakwater" J. Coastal Engineering. 49, pp. 1-24.
- Hu, X. and Adams, N.A. (2007). "An incompressible multi-phase SPH method" J. Computational Physics. 227, pp. 264-278.
- Karunarathna, S. and Lin, P. (2006). "Numerical simulation of wave damping over porous seabeds" J. Coastal Engineering. 53, pp. 845-855.
- Kobayashi, N. Cox, D.T. and Wurjanto, A. (1990). "Irregular wave reflection and run-up on rough impermeable slopes". J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 116(6), pp. 708-726.
- Lara, J. Garcia, N. and Losada, I. (2006). "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures" J. Coastal Engineering. 53, pp. 395-417.
- Lee, E.S. Moulinec, C. Xu, R. Violeau, D. Laurence, D. and Stansby, P. (2008). "Comparisons of weakly compressible and truly incompressible algorithms for the SPH mesh free particle method" J. Computational Physics. 227, pp. 8417-8436.
- Liu, G. and Liu, M. (2003). *Smoothed Particle Hydrodynamics- a Meshfree particle method*: World Scientific.
- Liu, F. Lin, P. Chang, K.A. and Sakakiyama, T. (1999). "Numerical modeling of wave interaction