

مدل سازی عددی نشست در محیط های متخلخل با استفاده از روش بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)

رضا تاتار

کارشناس ارشد عمران، گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان.

نام نویسنده مسئول:

رضا تاتار

چکیده

پدیده تراوش از بدنه و پی سدها از دیرباز به عنوانی یکی از عوامل مهم تخریب و ایجاد خسارت به سدها شناخته شده است از این رو محاسبه مقادیر و چگونگی عملکرد آن و در نتیجه یافتن روش های مناسب برای کاهش و یا جلوگیری از خسارت های ناشی از آن از اهمیت بالایی برخوردار است در سال های اخیر روش های عددی شامل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به دلیل پیشرفت های تکنولوژی به سرعت توسعه یافته است مدل های (CFD) نسبت به مدل های فیزیکی انعطاف پذیرتر بوده و به زمان ، هزینه و تلاش کمتری نیاز دارند، لذا به طور گسترده توسط مهندسين برای مدل کردن و تحلیل موضوعات پیچیده مربوط به طراحی های هیدرولیکی، مراقبت های عمرانی، طرح ریزی اولیه برای ایستگاه های تولید و ایمنی سد مورد استفاده قرار می گیرند. در این تحقیق مدل عددی دو بعدی که قادر به مدلسازی پدیده تراوش با شرایط اولیه مختلف باشد با بهره گیری از روش هیدرولیک ذرات هموار شده (SPH) با زبان برنامه نویسی فوترن (Fortran) تهیه شده است.

روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده، روش بدون شبکه متنی بر ذرات بوده که قادر به مدلسازی مسائل مختلف مکانیک سیالات است. معادله حاکم در این مدل، معادله لاپلاس است که با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک با داده های نرم افزاری متداول مورد استفاده در شبیه سازی پدیده نشست (SEEP/W) صورت گرفته است مقایسه کمی نتایج مدل عددی حاضر که همان دبی نشست از محیط های خاکی است نشان از دقت مناسب مدل عددی و خطای حدوداً ۱۰ درصدی نتایج دارد نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل عددی SPH مدلی مناسب و قدرتمند برای مدل سازی پدیده نشست در محیط های خاکی است. **واژگان کلیدی:** محیط های متخلخل، پدیده نشست، مدل سازی عددی، روش بدون شبکه ، روش هیدرودینامیک، ذرات همواره شده ، نرم افزار SEEP/W

مقدمه

آب به عنوان اساسی ترین ماده برای تشکیل حیات و ادامه چرخه زندگی موجودات زنده، از ابتدای پیدایش انسان از اهمیت فوق العاده ای برخوردار بوده است. اولین تمدن های بشری در کنار آب شیرین رودخانه شکل گرفته است. اهمیت وجود آب برای ادامه زندگی و به دست آوردن مواد غذایی دامی و کشاورزی با کمک آن از یک سو و در دسترس نبودن آب شیرین در تمام مناطق کره زمین از سوی دیگر، باعث گردید تا انسان در طول دوران حیات خود به فکر راهی برای انتقال و مهار و ذخیره آب بیفتد (قدسیان، ۱۳۸۲)

اصلی ترین روش برای مهار و ذخیره آب جاری رودخانه ها، استفاده و ساخت سدها و بندها بر روی آن هاست. سدها، سازه هایی هستند که به منظور ایجاد مخزن، افزایش ارتفاع هیدرولیکی یا ایجاد سطح وسیعی از آب ساخته می شوند از مخزن سدها برای ایجاد هماهنگی بین آب موجود و آب مصرفی استفاده می شود. مخازن برای ذخیره سازی موقت آب نیز کاربرد دارند. برای نمونه مصارف دیگر سدها تامین آب آشامیدنی، آبیاری و استفاده در نیروگاه ها را می توان برشمرد. سیلاب معمولاً در زمان وقع سیل، توسط سد ذخیره سازی و در فصل کم آبی مصرف می شود. بنابراین با توجه به این که سدها آب را ذخیره کرده و با تاخیر زمانی آن را رها می کنند، سازه های موثری برای کنترل سیل به شمار می روند. از مزایای دیگر سدها می توان تولید برق، تامین آب کشاورزی مورد نیاز، پرورش ماهی و ساخت تفرجگاه را نام برد. (قدسیان ۱۳۸۲)

انواع سدها را می توان از دیدگاه مصالح، فرم ساختمانی، هدف از احداث سد، نوع سرریز یا ویژگی های دیگر رده بندی نمود. آنچه معمولاً در نام گذاری ها مشاهده می شود عبارت است از :

- ۱-سد بتنی وزنی که پایداری آن بر اساس وزن آن است؛
 - ۲-سد بتنی که ممکن است تک قوسی یا دو قوسی باشد؛
 - ۳- سد بتنی پایه دار و پشت بنددار؛
 - ۴- سد پاره سنگی (که سنگی و سنگریزه ای هم گفته می شود)؛
 - ۵- سد خاکی که عمده مصالح آن مواد خاکی و پاره سنگی است.
- چنانچه سد نسبتاً بزرگ باشد و هدف از ایجاد آن ذخیره آب باشد، سد مخزنی نامیده می شود و در صورتی که هدف از احداث آن انحراف مسیر رودخانه یا تقسیم آب به صورت موقت یا دائم باشد آن را سد انحرافی یا بند انحرافی می نامند. (وفائیان ۱۳۸۹)

پدیده نشت^۱ در سدها و تحلیل آن

آب موجود در مخزن سدها به علت داشتن پتانسیل بالا همواره به دنبال راهی برای فرار و حرکت به سمت پایین دست سد است و به همین دلیل در توده متخلخل خاک بدنه و پی سدها نفوذ کرده و به سمت پایین دست جریان می یابد. از این رو یکی از عواملی که همواره موجودیت سدها و یا قابلیت اصلی آن ها که همان حفظ مقادیر زیاد آب در پشت سد است را مورد تهدید قرار می دهد، پدیده نشت و یا تراوش از بدنه و پی آن ها است. این پدیده در تمامی سدهای خاکی و پی سدهای بتنی در مقادیر متفاوت وجود دارد. خسارات ناشی از پدیده نشت در دهه های گذشته به حدی بوده است که عملاً ساخت سدها بدون در نظر گرفتن این پدیده در آن ها را به امری غیر مهندسی و غیر قابل قبول تبدیل نموده است زیرا بسیاری از سدها در اثر این پدیده و یا پدیده های مرتبط با آن مانند پدیده بالا زدگی و فشار برکنش دچار خسارات غیر قابل جبران به خود و خسارات جانی و مالی فراوان به انسان ها گردیده اند (رحیمی، ۱۳۹۲). در شکل ۱ نمونه ای از تخریب سد خاکی نمایش داده شده است که در آن علت تخریب گسترش شکاف در بدنه بر اثر پدیده نشت بوده است. هدف از تحلیل و بررسی عملکرد این پدیده، کنترل و مدیریت آن است تا از بروز خسارات غیر قابل جبران به سدها جلوگیری به عمل آید.



شکل ۱. تخریب سد تتون^۲ در آیداهو^۳ ایالات متحده آمریکا بر اثر گسترش نشست.

(<http://www.usbr.gov/pn/about/Teton.html.1393>)

پدیده نشست به عنوان یکی از اصلی ترین عوامل تخریب سدها، در ابتدا به وسیله روابط تجربی و تحلیلی و یا ساخت مدل هایی در ابعاد کوچک تر از اندازه طبیعی مورد بررسی و اندازه گیری قرار می گرفت که این روش ها علاوه بر داشتن مشکلات ناشی از عدم تطابق کامل با نمونه اصلی در اکثر موارد دارای هزینه های بالایی اجرایی بودند. پس از ظهور کامپیوترهای با قدرت محاسباتی بالا و در راستای آن معرفی روش های حل عددی معادلات دیفرانسیل که وابسته به استفاده از این ماشین های محاسباتی می باشند، این پدیده نیز همانند دیگر پدیده های علمی به وسیله روش های مختلف عددی مورد تحلیل و بررسی محققین بسیاری قرار گرفت. روش های مورد استفاده در حل عددی معادلات به لحاظ روش حل معادلات و نوع شبکه بندی محیط مورد بررسی، قابل تقسیم بندی می باشند.

اصلی ترین روش های عددی مورد استفاده در مدل سازی پدیده نشست تاکنون، روش های تفاضل محدود، المان محدود و حجم محدود می باشند که هر کدام دارای قابلیت ها و معایبی می باشند.

انتخاب روش عددی جهت مدل سازی

همان طور که در بخش قبلی بدان اشاره شد، مدل سازی عددی یکی از مهمترین روش های بررسی پدیده نشست می باشند برای مدل سازی عددی این پدیده، باید معادله حاکم بر مسئله، که در حالت شرایط تراوش همگن^۴ و همسالان^۵، همان معادله لاپلاس است با استفاده از روشی مناسب مورد گسسته سازی مکانی قرار گرفته و جواب های این معادله با مشتقات جزئی به عنوان جواب های مسئله، گزارش شوند. موضوع مورد مطالعه، در این پایان نامه به کارگیری روش عددی بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار شده^۶ برای مدل سازی عددی پدیده نشست است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH)، روش مبتنی بر ذرات بود که از یک تابع هموار^۷ برای مدل سازی بر هم کنش بین ذرات استفاده می نماید. با توجه به مطالعات پیشین می توان مدعی شد که تکنیکی قدرتمند برای مدل سازی مسائل دینامیکی مختلف در هیدرولیک است. روش هیدرولیک ذرات هموار شده که در مسائل با هندسه پیچیده و نامنظم بسیار تطبیق پذیر و کاربردی است، در این تحقیق استفاده گرفته است تا به کمک آن بتوان پدیده نشست را به نحوی دقیق تر، با سرعت زمانی بالاتر و روشی قابل تطبیق تر با شرایط نمونه اصلی طرح، مورد ارزیابی قرار داد. در فصل دوم تعدادی از کاربردهای روش SPH در مکانیک سیالات مروری خواهد شد.

² Teton dam

³ Idaho

⁴ homogeneous

⁵ Isotropic

⁶ Smoothed Particle Hydrodynamics

⁷ Smoothing function

روش تحقیق

در این تحقیق از روش هیدرولیک ذرات هموار شده (SPH) برای تحلیل پدیده نشت در محیط های متخلخل از جمله پی و بدنه سدها استفاده شده است مراحل در نظر گرفته شده برای انجام این تحقیق عبارتند از :

- ۱- مطالعه تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدلسازی پدیده نشت
- ۲- شناخت روش SPH و نحوه گسسته سازی معادله حاکم با استفاده از آن و نحوه اعمال شرایط مرزی در آن برای مدل سای عددی پدیده نشت در محیط های متخلخل؛
- ۳- توسعه کد کامپیوتری مدل سازی نشت با استفاده از روش SPH ؛
- ۴- نهایتاً، مدل سازی پدیده نشت در محیط های متخلخل از جمله پی سد بتنی و بدنه سد خاکی و مقایسه خروجی مسائل مورد بررسی با جواب های نرم افزار متداول مورد استفاده در شبیه سازی پدیده نشت (نرم افزار SEEP/W) و تعیین دقت و کارایی مدل عددی توسعه داده شده.

اهمیت پدیده نشت

برخلاف تصور عمومی، نواحی مرطوب در پایین دست سدها، همیشه چشمه های آب طبیعی نمی باشند. بلکه می توانند در اثر تراوش به وجود آمده باشند. حتی در صورت وجود چشمه های طبیعی آب می بایست تغییر رفتار و میزان آبدی آن ها را با دقت فراوان مورد بازدید و بررسی قرار داد، زیرا جریان ناشی از سفره های آب های زیرزمینی که در محدوده مخزن سد قرار دارند احتمالاً در اثر فشار اعمال شده از مخزن آب پشت سد دچار افزایش خواهد شد. (استنلر^۸، ۲۰۰۳).

پدیده نشت یا همان تراوش در تمامی سدها در ابعاد و مقادیر متفاوتی وجود دارد که این پدیده لزوماً مخرب نبوده و باعث بر هم زدن پایداری سد نمی گردد نشت می تواند در هر جایی بر روی سطح پایین دست سد، زیر پنجه و یا پی پایین دست، در ترازهای پایین تر از تراز نرمال مخزن پدیدار شود برای قسمت های پاشنه پایین دست سد یعنی همان مناطقی که رو به پایین دست سد با پی در تماس است، همیشه می بایست انتظار مشاهده نشت را داشت. نشت هم چنین می تواند از میان محل تماس بدنه سد با سازه سرریز، زهکش ها و یا دیگر سازه های وابسته به وجود آید و باعث حرکت و رانش مصالح بدنه و یا پی در نهایت به خطر افتادن موجودیت سد گردد، هدف از تحلیل و بررسی این پدیده نظارت و مدیریت آن و کنترل رفتار هیدرولیکی به وجود آمده از تراوش و جلوگیری از خرابی و آسیب دیدگی سد است. افزایش غیر عادی مقادیر تراوش می تواند نشان دهنده تغییر شرایط نرمال سد که در نتیجه آن منجر به وجود آمدن جریان غیر قابل کنترل تراوش می شود، دانست رگاب شدگی^۹ و فرسایش داخلی هنگامی که پیشرفت نماید ممکن است باعث خرابی و یا شکست سد شوند (استنلر، ۲۰۰۳).

مطالعات انجام گرفته بر روی هفتاد و هفت مورد از شکست سدها در ایالات متحده و تا دهه هشتاد میلادی به وسیله انجمن مهندسين عمران امریکا^{۱۰} و کمیته سدهای بزرگ ایالات متحده^{۱۱} نشان می دهد که در حدود پنجاه درصد از کل خرابی سدها به علت فرا ریزش جریان از روی سد به علت عدم ظرفیت کافی سرریز است. پدیده رگاب شدن و فرسایش داخلی بدنه و مصالح پی در حدود چهل و پنج تا پنجاه درصد از علل خرابی سدها را به خود اختصاص می دهند و عوامل دیگر خرابی سدها مانند عدم پایداری شیب و زمین لرزه های قوی درصد کمی از این امار را به خود اختصاص می دهند (استنلر ۲۰۰۳)

مکانیزم نشت در محیط های خاکی

در حالت کلی سه مکانیزم عمده برای نشت در محیط های خاکی وجود دارد که عبارت اند از رگاب شدن، فرسایش داخلی و فشار بر کنش، پدیده رگاب شدن نوعی فرسایش و تجمع مصالح بدنه سد و قسمت پشت سد است و هنگامی که گردایان فشار در منطقه خروجی از مقاومت خاک بیشتر شود، آغاز می گردد جریان نشت به اندازه ای نیرو دارد که باعث فرسایش و حرکت ذرات خاک به خارج از بدنه سد و پی آن شود. این خوردگی مصالح موجب افزایش گردایان جریان می گردد این فرایند در قسمت پشت منبع آب و شکل تشکیل یک لوله فرضی برای عبور جریان تراوش عمل می نماید ابعاد لوله جریان تا زمان ایجاد شکاف هر سد و با نشست نامتقارن در سد و فرایزی جریان

⁸ Stateler

⁹ Piping

¹⁰ ASCE

¹¹ USCOLD

آب از روی آن و یا ایجاد ناپایداری در شیب بدنه سد افزایش می یابد. (انگموئن^{۱۲} ۲۰۰۳). فرایند رگاب شدن می تواند ناگهانی رخ دهد، اما وقتی که یک لوله پایدار جریان شکل گرفت. در اثر آن ایجاد خرابی زودرس برای سد قابل پیش بینی است. برای پیشرفت و ایجاد پدیده رگاب شدن، چهار شرط زیر می بایست وجود داشته باشد:

-مسیر جریان به همراه منبع آب؛

-خروجی غیر حفاظت شده مانند خروجی آزاد و یا بدون فیلتر در محل خروج ذرات خاک؛

-مصالح بدنه فرسایش پذیر و قابل تحمل توسط جریان؛

-قابلیت تشکیل حالت لوله ای برای مصالح بدنه (در واقع مصالح بدنه باید قادر باشند تا حالت یک سقف برای مجریان جریان را به وجود آورند).

خاک های مستعد برای پدیده رگاب شدن شامل شن های یکنواخت و دانه ریز، خاک های پراکنده، خاک های با تراکم پایین (کمتر از ۹۵٪ تراکم استاندارد) و خاک های متراکم شده با رطوبت کمتر از محتوی بهینه آب می باشند. مطابق با سیستم طبقه بندی استاندارد این خاک ها شامل خاک های SM-SM-ML, ML می باشند. به علاوه تحقیقات انجام گرفته نشان می دهد که خاک های نیمه اشباع و خاک هایی که بیشتر از ۱۵٪ آن ها را مصالح ریزدانه تشکیل داده اند بیشتر قابلیت تبدیل شدن به حالت سقف برای لوله جریانی را دارا می باشند. (انجمن دولتی ایمنی سدها^{۱۳} ۲۰۰۴)

حالت دوم مکانیزم های شناخته شده برای نشت، فرسایش داخلی^{۱۴} است. فرسایش داخلی از لحاظ چگونگی پیشرفت تراوش و ایجاد خرابی در سد متفاوت از پدیده رگاب شدن است در این حالت نشت به شکل یک جریان غنی شده از یک ترک خوردگی و یا از منبع آب شروع می شود و تا نقطه خروجی ادامه می یابد. مصالح به شکل افزایش در تمام طول مسیر تراوش شسته شده و حمل می شوند گسترش این ترک ها و در نتیجه تراوش غنی شده، به عوامل مختلفی از قبیل تراکم ضعیف خاک، خشکی مصالح و ترک خوردگی ناشی از آن تجربه شدن مصالح درشت دانه و یا یخ زدگی و آب شدن متناوب مصالح بستگی دارد نشت نامتقارن سد، زمین لرزه ها و یا ناپایداری شیب بدنه نیز می تواند باعث ایجاد خوردگی و شکست هیدرولیکی گردند. (فل و فاستر^{۱۵} ۲۰۰۰)

حالت دیگر از فرسایش داخلی، ترشح یا پایداری^{۱۵} داخلی است. پایداری داخلی عبارت است از شسته شدن مصالح ریزدانه از درون خاک های ناپایدار، این پدیده باعث ایجاد یک سوم از حالت های وقوع گرادیان بحرانی برای پدیده بر کنش و بلندشدگی توده خاک در سدها است (فل و فاستر^{۱۶} ۲۰۰۰) مصالح مستعد این پدیده شامل مصالح با دانه بندی گسسته مانند مصالح درشت دانه به همراه خاک های بسیار ریز درون آن و با تراکم کمتر از ۹۵٪ حالت تراکم استاندارد می باشند (انجمن دولتی ایمنی سدها^{۱۷} ۲۰۰۴)

یکی دیگر از مکانیزم های عمل کننده نشت که باعث خرابی و شکست سدها می شود، مکانیزم بالازدگی^{۱۶} (بلند شدن توده خاک) است. این پدیده زمانی رخ می دهد که گرادیان فشارناشی از نشت از وزن توده خاک روی آن بیشتر گردد، این وضعیت عموماً در قسمت رویه های غیر حفاظت شده در قسمت پایین دست پنجه سد رخ می دهد (ناحیه بین نقاط A و B در شکل ۱) گرادیان های بالا فشار باعث حرکت رو به بالای ذرات خاک لایه های بالایی توسط جریان و به وجود آمدن حالت جوشش در خاک می شود احتمال افزایش خطر پدیده بالازدگی در زمانی که ارتفاع آب مخزن برای اولین بار به حداکثر خود می رسد، بیشتر بوده و احتمال خرابی و خسارت سریع زیاد است. همچنین این وضعیت برای شرایطی که یک لایه نفوذناپذیر در قسمت خروجی از جریان نشت جلوگیری می کند، باعث افزایش فشار در زیر آن منطقه و افزایش خطر بالازدگی می گردد. (گراهام^{۱۷} ۱۹۹۷)

¹² Engemoen

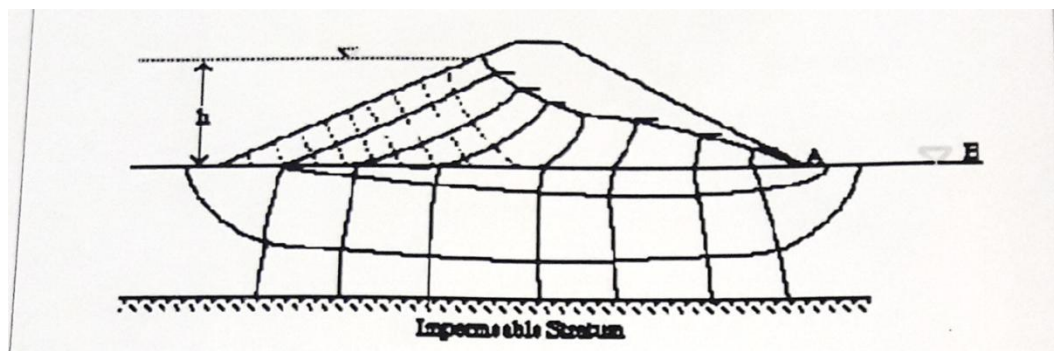
¹³ Association of State Dam Satety Officcials

¹⁴ Internal erosion

¹⁵ Suffusion

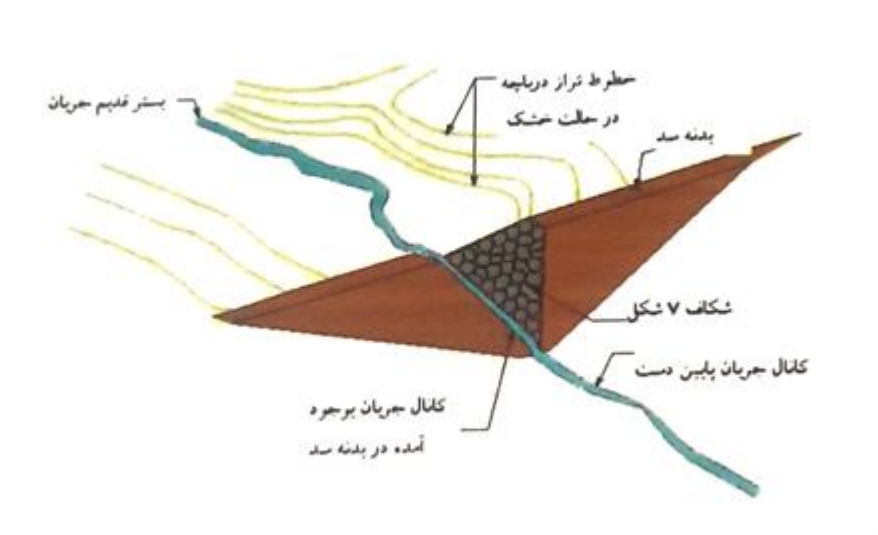
¹⁶ Blowout or heaving

¹⁷ Graham



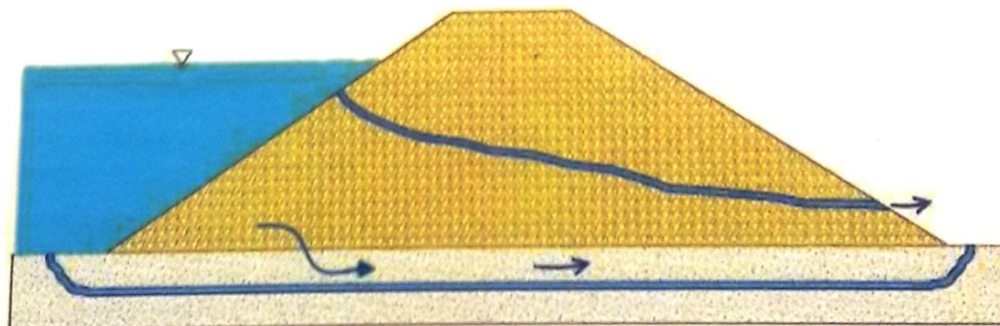
شکل ۱- مناطق مستعد پدیده بالازدی چاپ شده از (گراهام ۱۹۹۷)

خرابی یا شکست سد را می توان به شکل به وجود آمدن یک مجرا درون بدنه به نحوی که یک سطح مقطع از بدنه سد از بین برود و مخزن سد توانایی ذخیره آب را از دست بدهد، توصیف نمود. (شکل ۲) هنگامی که از خرابی و شکست سد به نحوی ممانعت شده ولی خسارت آشکار از جریان تراوش قابل رویت باشد به آن آسیب دیدگی سد اطلاق می گردد. این آسیب ها در حالی رخ می دهند که پدیده رگاب شدن یا فرسایش داخلی قبل از تشکیل مجرا برای خروج آب از بدنه متوقف گردند (استتler ۲۰۰۳)



شکل ۲ شکست سد (استتler ۲۰۰۳).

پدیده نشست در سه حالت متفاوت باعث ایجاد خرابی و خسارت سد می گردد این موارد شامل تراوش جریان از درون بدنه سد، تراوش جریان از پی و کف سد و تراوش از درون سد به درون پی سد است که در شکل ۲-۳ نمایش داده شده اند.



شکل ۳ حالت های مختلف پدیده تراوش (استتler ۲۰۰۳)

همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، پدیده رگاب از میان بدنه سد به عنوان مهمترین عامل خرابی درسدها شناخته می شود و بعد از آن جریان تراوش از پی سد از اهمیت بیشتری نسبت به تراوش از بدنه به پی برخوردار است. (استتler ۲۰۰۳)

جدول ۱ درصد خرابی ناشی از حالت های مختلف نشست (استتار ۲۰۰۳)

درصد شکست (بعد از سال ۱۹۵۰)	درصد شکست (قبل از سال ۱۹۵۰)	نوع شکست
۳۲/۲٪	۳۶/۲٪	جریان نشست از درون بدنه
۸/۵٪	۱۷/۲٪	جریان نشست از درون بدنه به داخل پی سد
۵۴/۲٪	۴۴۸٪	جریان نشست از درون پی

فل و فاستر در سال ۲۰۰۰ تمامی خرابی های سدهای بزرگ (سدهای با ارتفاع بزرگ تر از ۱۵ متر) را از سال ۱۹۸۶ بررسی نمودند. در جدول ۲-۲ درصد هر یک از انواع تراوش از نوع رگاب و خسارات ناشی از آن ها آورده شده است. این آمار متفاوت با آمارهای قبلی از اطلاعات به دست آمده از مطالعات انجمن مهندسين عمران آمریکا و کمیته سدهای بزرگ ایالات متحده است. اما نشان میدهد که ۲٪ از تمامی سدهای خاکی بزرگ تا ۱۹۸۶ حداقل یک آسیب دیدگی ناشی از پدیده رگاب شدن را داشته اند و طبق آمار انجمن مهندسين عمران آمریکا و کمیته سدهای بزرگ ایالات متحده در حدود نیمی از آسیب های در بدنه سدها در بدنه آن ها به وجود می آید و آسیب پی ها در مرحله بعدی قرار دارد.

جدول ۲ درصد وقوع پدیده حالت جریان لوله ای در سدهای بزرگ (فل و فاستر ۲۰۰۰)

نوع تراوش	تناوب وقوع		
	مجموع (٪)	خسارت (٪)	شکست (٪)
از درون بدنه	۱/۰۲	۰/۶۷	۰/۳۵
از درون پی	۰/۷۹	۰/۶۲	۰/۱۷
از بدنه به درون پی	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۰۲
مجموع	۲/۰۴	۱/۵	۰/۵۴

بهره برداری از سد در طی اولین آبیگیری، بهره برداری در ۵ سال اول بعد از ساخت آن و نیز هنگامی که آب به تراز ماکزیمم مخزن و یا بیشتر از آن می رسد، بحرانی ترین شرایط برای ایجاد پدیده تراوش می باشند (فل و فاستر ۲۰۰۰). در حدود پنجاه درصد از خسارات به وجود آمده ناشی از پدیده رگاب شدن، در طی اولین آبیگیری و چهارده درصد در طی پنج سال اول رخ می دهد. در طی اولین آبیگیری مصالح بدنه حالت نیمه اشباع دارند که ممکن است باعث شروع ترک خوردگی و یا تشکیل حالت لوله ای در خاک شود. پدیده رگاب شدن همچنین می تواند به طرز قابل توجهی به تراز آب مخزن مربوط شود در بررسی های انجام شده در محل هایی که اطلاعات مناسب از تراز آب مخزن موجود بوده است نشان می دهد که اکثریت خرابی سدها در هنگام افزایش تراز آب مخزن به میزان یک متر بیشتر از تراز حداکثر قبلی مخزن رخ داده است وجود مجراها و دیوارها به میان بدنه سدها نیز از عوامل دیگر موثر در ایجاد پدیده رگاب شدن می باشند (فل و فاستر ۲۰۰۰).

روش های کنترل نشست

جهت جلوگیری از خسارت به وجود آمده ناشی از پدیده نشست در سدها، روش های مختلفی وجود دارند این روش ها که در ادامه آورده شده اند که با توجه به شرایط طرح مانند بدنه و پی و همچنین شرایط زمین شناسی، یک و یا چند روش از آن ها را می توان مورد استفاده قرار داد. (بویر^{۱۸} ۲۰۰۳)

- حفاظت کننده های با نفوذپذیری کم مانند رس ها که در طول سطح بالادست قرار می گیرند (بویر ۲۰۰۳)
- استفاده از دیوارهای با هسته بتنی و یا دوغاب شده (بویر ۲۰۰۳)
- استفاده از رویه بتنی و یا روکش های رسی بر روی بدنه سد، این روکش ها می بایست تا زیر ناحیه بالادست امتداد یافته و به هسته نیز متصل شوند این روش می تواند در مکان هایی که خاک فونداسیون عمیق بوده دارای مصالح آبرفتی بسیار نفوذپذیر بوده و در نتیجه استفاده از دیوارهای آب بند عملی نیست کاربرد می باشد (بویر ۲۰۰۳)

- تزریق در پی سد که برای پی های با سنگ بستر کمتر و یا سنگ هایی به هم متصل شده قابل کاربرد است در طراحی این پی ها برای تزریق می بایست آزمایش هایی با فشار آب جهت مشخص کردن خصوصیات و شرایط تزریق انجام شود (بویر^{۲۰}۳).

- ایجاد دیوارهای آب بند و زهکش ها در پی که هدف از آن ها قطع و یا افزایش مسیر حرکت تراوش در زیر بدنه است این دیوارهای آب بند می بایست تا حد امکان تا درون سطح خاک با نفوذپذیری کم ادامه یابد. دیواره های ساخته شده تزریق دوغاب می تواند در پی های مصالح رسوبی عمیق مفید باشند اما باید در نظر داشت که این عمل می تواند از نصف مقدار تراوش جلوگیری نماید. پرده های آب بند در مواقعی که از سه ردیف آن ها و همراه با یک زهکش در پشت سر آن ها بکار گرفته می شود بیشترین تاثیر را دارد. (بویر^{۲۰}۳).

- قطع کننده و جمع آوری کننده جریان تراوش و سیستم های اندازه گیری آن مانند: روکش ها^{۱۹} «گالریهای جمع آوری کننده جریان» که به یک سازه اندازه گیر جریان مانند سرریز^{۲۰} متصل شده باشند این سرریزها اگر تمیز نگه داشته شوند به خوبی می توانند لحظه شروع به حرکت ذرات و مصالح را نشان دهند.

زهکش های قسمت پنجه پایین دست نیز یک خروجی را برای اندازه گیری و نظارت و بازبینی^{۲۱} جریان تراوش فراهم می آورند (دفتر احیای منابع آب وزارت کشور ایالات متحده^{۲۲} ۱۹۸۷).

- پایدار سازی پی ها مانند تزریق دوغاب سیمان و بتن غیر سازه ای تزریق سیمان یک روش سطحی برای آب بند نمودن محل اتصالات و گسیختگی های بستر و جلوگیری از حرکت و انتقال مصالح هسته از بدنه به داخل پی است. (دفتر احیای منابع آب وزارت کشور ایالات متحده ۱۹۸۷).

- ایجاد بار اضافی^{۲۳} در پشت سد برای افزایش ضریب اطمینان (شمسایی ۱۳۸۱).

- نصب مواد ژئوتکستای^{۲۴}ل در پشت سد که از عبور مواد ریزدانه جلوگیری کرده و عبور آب را تسهیل می نماید. (شمسایی ۱۳۸۱).

چاه های فشار شکن که معمولا در پنجه پایین دست سد قرار می گیرند و باعث جمع آوری آب و کنترل فشار بر کنش آن می شوند و معمولا در مواردی که سد بر سنگ بسترهای گسیخته شده قرار گرفته و از دیواره آب بند نیز استفاده نشده است و امکان استفاده از زهکش های نرمال نیز وجود ندارد مورد استفاده قرار می گیرند. از مزایای استفاده از این چاه ها، امکان ایجاد و نصب آن ها بدون پایین آوردن آب مخزن پشت سد می باشند و البته استفاده از این روش احتیاج به نگهداری و تعمیرات مداوم دارد و گاهی از اوقات نیز از نظر ظرفیت دارای محدودیت هایی می باشند. (دفتر احیای منابع آب وزارت کشور ایالات متحده ۱۹۸۷).

نفوذپذیری ونشت

هر توده خاکی ازدانه های جامد با اندازه های مختلف و فضاهای خالی به هم پیوسته تشکیل شده است فضاهای خالی به هم پیوسته در خاک این اجازه را می دهند که آب از یک نقطه با انرژی بالا به سمت نقطه دیگر با انرژی پایین حرکت کند خاصیتی از خاک که اجازه نشت مایعاتی از بین فضاهای خالی به هم پیوسته را میدهد، خاصیت نفوذپذیری نامیده می شود.

قانون دادرسی

دادرسی^{۲۵} مهندس فرانسوی در سال ۱۸۵۶ تحقیقات آزمایشگاهی را بر روی جریان عمومی آب در میان خاک و در هنگام عبور از فیلترها انجام داد او برای به دست آوردن یک رابطه اساسی برای مقدار نشت آب از درون توده خاک در شرایط معین مدلی مانند شکل (ا) را در نظر گرفت که در آن سطح مقطع عرضی خاک برابر A و دبی نشست برابر q است. (سدرگرن^{۲۶} ۱۹۹۷).

مطابق باقانون برنولی، بار آبی کل جریان در هر مقطع از خاک برابر با حاصل مجموع بار آبی نظیر سرعت، بار آبی نظیر فشار و بار آبی نظیر ارتفاع است بار آبی نظیر سرعت برای جریان آب در خاک ناچیز و قابل صرف نظر کردن است (سدرگرن ۱۹۹۷).

معرفی معادلات حاکم و فرمول بندی روش هیدرودینامیک ذرات همواره شده با جزئیات مورد بررسی قرار می گیرد این جزئیات شامل معرفی اصول روش هیدرودینامیک ذرات همواره شده و نحوه گسسته سازی معادلات با روش مذکور است همچنین در این قسمت الگوریتم حل معادلات، نحوه اعمال شرایط مرزی و مدر کامپیوتری تهیه شده تشریح خواهند شد.

¹⁹ Blanket

²⁰ Weirs

²¹ Monitoring

²² USBR

²³ Sucharge load

²⁴ Geotextile

²⁵ Darcy

²⁶ Cedergrén

معادلات حاکم

همان طور که در بخش قبل توضیحات کامل داده شد، از ترکیب معادله پیوستگی جریان در محیط خاکی و قانون دادرسی، معادله ریاضی حرکت آب در محیط نفوذپذیر در حالت دوبعدی برای جریان دائمی، به صورت ذیل در می آید.

(۱-)

$$\frac{\partial (-k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (-k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z})}{\partial z} = 0$$

$$\left[\frac{\partial k_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + \left[\frac{\partial k_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = 0$$

که در این معادله k_x و k_z به ترتیب ضریب نفوذپذیری در جهات x و z و h بار آبی یا همان پتانسیل آبی است. با فرض همگن و همسان بودن خاک و برقرار بودن شرایط آرام، این معادله به معادله لاپلاس تبدیل خواهد شد.

(۲-)

$$\frac{\partial^2 (kh)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (kh)}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = 0$$

در بخش های بعد شیوه گسسته سازی این معادلات با روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده تشریح می شود.

فرمول بندی روش هیدرودینامیک ذرات همواره شده

تعریف تابع

به منظور تقریب توابع در مسائل مختلف به کمک روش های عددی، سه روش کلی استفاده می گردد این سه روش عبارتند از :

- ۱- درون یابی انتگرالی محدود: از جمله روش هایی که در این دسته قرار می گیرند می توان به روش های Kerner reproduction، Smoothed Particle Hydrodynamics، Reproducing kernel Particle، General اشاره نمود.
- ۲- درون یابی به کمک سری های ریاضی محدود: از جمله روش هایی که در این دسته قرار می گیرند می توان به روش های Finite Element، Moving least squares اشاره نمود.
- ۳- درون یابی دیفرانسیلی محدود: از جمله روش هایی که در این دسته قرار می گیرند می توان به روش های Finite point، Finite difference اشاره نمود.

شکل ۱-۳ مفهوم این روش ها را شماتیک وار نمایش می دهد (لیو ۲۰۰۳)

روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده از مفهوم درون یابی انتگرالی^{۲۷} برای تقریب توابع استفاده می نماید مفهوم درون یابی انتگرالی تابعی مانند $f(r)$ در حالت کلیدر نقطه مشخص r_0 با معادله ذیل بیان می گردد.

(۳-)

$$f(r_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \delta(r_0 - \xi) d\xi$$

که در این معادله تابع دلتای دیراک بوده که به صورت ذیل تعریف می شود:

(۴-)

$$\delta(r_0 - \xi) = \begin{cases} 1 & \text{if } r_0 = \xi \\ 0 & \text{if } r_0 \neq \xi \end{cases}$$

مقداری که برای کمیت مطلوب با این انتگرال به دست می آید کاملاً دقیق است اما استفاده از این انتگرال عملاً در تجزیه و تحلیل های عددی غیرممکن است. در روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده از تابع هموار برای درون یابی انتگرالی محدود جهت تقریب تابع مورد نظر استفاده می شود.

(۵-)

$$f(r) = \int_{\Omega} f(r) \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr$$

که در این معادله $\widehat{W}$ تابع درون یابی کرنل، r بردار موقعیت، h طول هموار^{۲۸} و Ω ناحیه تاثیر^{۲۹} اطراف نقطه مطلوب است. محدوده اطراف یک نقطه مشخص را که نقاط واقع در این محدوده در درون یازی مقدار کمیت یک پارامتر در نقطه مورد نظر دخیل هستند ناحیه تاثیر آن نقطه می گویند که با پارامتر طول هموار کنترل می گردد. گسسته سازی معادله (۵-۳) با استفاده از تعداد نقاط محدودی که به آن ها اصطلاحاً، ذره می گویند و دارای اطلاعات محاسباتی جریانی مانند جرم، چگالی، فشار، موقعیت و سرعت می باشند انجام می شود شکل گسسته معادل (۵-۳) به صورت ذیل است:

(۶-)

$$f(r_j) = \sum_j^m \frac{j}{\rho_j} f(r_j) \widehat{W}(|r_i - r_j|, h)$$

در معادله (۶-)، i بیان گر ذره مرکزی، j ذرات همسایه ذره مرکزی در داخل ناحیه ذره مرکزی، m جرم ذرات و ρ چگالی ذرات است.

مشتق فضایی تابع

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده به طور کلی عملگر مشتق بر روی تابع هموار اثر می نمایند فرض کنید مشتق تابعی مانند f مورد نظر است با توجه به معادله (۶-۳) مقدار این تابع به صورت ذیل بیان می شود:

(۷-)

$$f(r) = \int_{\Omega} f(r) \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr$$

مشتق فضایی این تابع به صورت معادله ذیل بیان میشود:

(۸-)

$$\langle \nabla . f(r) \rangle = \int_{\Omega} [\nabla . f(r)] \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr$$

(۹-)

$$\langle \nabla . f(r) \rangle = \int_{\Omega} [\nabla . f(r)] \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr - \int_{\Omega} [\nabla . f(r)] \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr$$

با استفاده از تئوری دیورژانس انتگرال اول معادله (۹-۳) به انتگرال سطح تبدیل می شود:

(۱۰-)

$$\langle \nabla . f(r) \rangle = \int_{\Omega} [\nabla . f(r)] \widehat{W}(|r - r_0|, h) . nds - \int_{\Omega} [\nabla . f(r)] \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr$$

این معادله n بردار نرمال عمود بر سطح S می باشد. تابع کرنل ($\widehat{W}$) دارای ناحیه تاثیر محدود می باشد به طوری که در خارج از این ناحیه این تابع دارای مقدار صفر خواهد بود زمانی که مشتق فضایی برای نقطه ای با فاصله بیشتر از kh از سطح S تعیین می شود، انتگرال اول در معادله (۱۰-) صفر شده و مشتق فضایی تابع f به صورت ذیل تعیین می شود:

(۱۱-)

$$\langle \nabla . f(r) \rangle = \int_{\Omega} [f(r)] \nabla . \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr$$

²⁸ Smoothing length

²⁹ Influence domain

در مورد نقاط واقع در ناحیه تاثیر برای جلوگیری از اثرات مرزی این ترم صفر در نظر گرفته می شود با توجه به معادله (۱۱-) شکل گسسته شده مشتق تابع f به صورت معادله های ذیل در خواهد آمد.

(۱۲-)

$$\langle \nabla . f(r_i) \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(r_j) . \nabla \widehat{W}(|r_i - r_j|, h) \quad (13-)$$

$$\langle \nabla . f(r_i) \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(r_j) . \nabla \widehat{W}_{ij}$$

تابع کرنل

همان طور که در بخش های قبل اشاره شده، روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده روش بدون شبکه های است که از ذرات برای گسسته سازی دامنه محاسباتی استفاده می نماید در بخش قبل نشان داده شده که در این روش جهت انجام درون یابی انتگرال محدود از تابع کرنل برای تقرب تابع دلتای زیراک استفاده می شود. انتخاب تابع کرنل مناسب و طول هموار کافی از عوامل مهم در سرعت، دقت و پایداری محاسبات روش مزبور است. برای مطمئن شدن از کوچک بودن خطاهای ناشی از تقریب درون یاب های انتگرالی با درون یابی های مجموع (سری ها) باید مشتق دوم این تابع پیوسته باشد.

جهت پایدار و دقیق بودن بیان انتگرالی محدود معادله (۱۴-) تابع کرنل باید شرایط ذیل را داشته باشد:

۱- تابع کرنل باید مثبت باشد:

$$\widehat{W}(|r - r_0|, h) > 0 \quad \dots \quad \text{over } \Omega \quad (15-)$$

۲- تابع کرنل باید در دامنه ی محاسباتی یگانه باشد (خاصیت یگانگی).

$$\int_{\Omega} \widehat{W}(|r - r_0|, h) dr = 1 \quad (16-)$$

۳- تابع کرنل باید دامنه محاسباتی محدود داشته باشد (خاصیت متراکم بودن)

$$\widehat{W}(|r - r_0|, h) > 0, \text{ for } |r - r_0| > kh \quad (17-)$$

۴- تابع کرنل زمانی که $|r - r_0| = 0$ است دارای مقدار بیشینه و زمانی که $|r - r_0| = kh$ دارای مقدار صفر است. در ناحیه بین این دو نقطه، این تابع باید اکیدا یکنوا باشد (خاصیت نزولی)

۵- زمانی که طول هموار h به سمت صفر میل می نماید تابع کرنل رفتاری مطابق تابع دلتای دیراک دارد (عملکرد مشابه تابع دلتای دیراک)

$$\lim_{h \rightarrow 0} \widehat{W}(|r - r_0|, h) = \delta(r - r_0) \quad (18-)$$

۶- تابع کرنل باید متقارن باشد. بدین معنی که دو ذره در فاصله یکسان با ذره i اما در موقعیت های مکانی مختلف باید تاثیر یکسان بر روی آن داشته باشند.

۷- تابع کرنل باید به اندازه کافی همواره باشد هر چه تابع کرنلتر باشد به پراکندگی ذرات کمتر حساس است.

شرط اول، مثبت بودن، یک الزام ریاضی نیست، بلکه به منظور بیان پایدار و معنادار یک پدیده فیزیکی، اعمال می گردد به عنوان مثال در مسائل دینامیک سیالات، یکی از متغیرهای مسائل، چگالی بوده که هیچ گاه نمی تواند منفی باشد.

شرط دوم، یگانگی، سازگاری مرتبه صفر (0^0) بیان انتگرالی یک تابع پیوسته را ارضا می نماید این خصوصیت نشان میدهد که انتگرال تابع کرنل در ناحیه تاثیر خود یگانه است.

شرط سوم، متراکم بودن، در روش SPH از اهمیت خاصی برخوردار است این خصوصیت، منجر به اعمال تقریب به کمک تعداد محدودی از ذرات می گردد مقدار تابع هر ذره به مقدار تابع در ذرات محدودی که در ناحیه تاثیر آن ذره قرار دارد، بستگی دارد.

شرط چهارم، خاصیت نزولی، یک الزام ریاضی نبوده ولی نشان می دهد که نیروی هر ذره بر ذره دیگر با افزایش فاصله بین آن ها کاهش می یابد.

شرط پنجم: تعریف تابع کرنل است، اما در محاسباتی عددی هیچ گاه طول همواره به مقدار صفر نمی رسد. به طور خلاصه شرط های ۲ و ۳ حداقل لزوم ها برای ساخت تابع کرنل می باشند در نظر گرفتن کلیه شرایط فوق الذکر منجر به تقریب های مناسب از متغیرهای مسئله با استفاده از تابع کرنل می شود. با این وجود بسیاری از توابع همواری که تا به حال مورد استفاده قرار گرفته اند برخی از این شرایط را دارا نیستند. (لیو ۲۰۰۳). انتخاب تابع کرنل مناسب توابع هموار مناسب نقش مهمی در دقت روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده بازی می کند این توابع بر اساس شرایط مطرح شده در بخش قبل تعیین می شوند. به عنوان مثال تابع گوسین $\widehat{W}_{ij} = a_a e^{-q^2}$ شش شرط از هفت شرط بالا را ارضا می نمایند اما این تابع شرط تراکم پذیری را دارا نمی باشد اکثر توابع هموار از نوع توابع زنگوله ای می باشند. (لیو ۲۰۰۳) تابع کرنل انتخاب شده برای این تحقیق، تابع درون یابی Cubic spline است که به وسیله موناگان (۲۰۰۰) معرفی شده است. (۱۹-)

$$\widehat{W}_{ij} = \begin{cases} \frac{10}{7\pi h^2} (1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3), & \text{if } 0 \leq q < 1 \\ \frac{10}{28\pi h^2} (2 - q)^3, & \text{if } 1 \leq q \leq 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

در رابطه ذکر شده $q = \frac{r_{ij}}{h}$ است که r_{ij} قدر مطلق فاصله بین ذرات i و j است $\widehat{W}_{ij}$. به طول هموار h و q به فاصله بین ذرات r_{ij} بستگی دارد به منظور به دست آوردن مشتقات فضایی تابع، مشتق این تابع کرنل باید به صورت تحلیلی محاسبه شود مشتق فضایی این تابع کرنل از معادله (۲۰-) به دست می آید در این عبارت $\frac{\partial \widehat{W}_{ij}}{\partial r_{ij}}$ از رابطه ذیل به دست می آید. (۲۱-)

$$\widehat{W}_{ij} = \begin{cases} \frac{10}{7\pi h^3} (-3q + \frac{9}{4}q^2), & \text{if } 0 \leq q < 1 \\ \frac{10}{28\pi h^2} (-3 - q)^2, & \text{if } 1 \leq q \leq 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

طول هموار

همان طور که در بخش تعریف تابع کرنل بدان اشاره شد، تابع انتخاب شده در مدل حاضر به ازای $\frac{r_{ij}}{h} > 2$ مقدار صفر را دارا می باشد، یعنی در این حالت هیچ گونه اندرکنشی بین ذرات وجود ندارد. طول هموار در واقع بیان کننده ناحیه تاثیر اطراف یک ذره مرکزی است که با ذرات واقع در این ناحیه بر هم کنش دارد، به عبارت دیگر می توان گفت که ناحیه تاثیر یک ذره، دایره ای است با مرکزیت ذره مورد نظر و به شعاع $2h$ مقدار طول هموار تاثیر مستقیمی بر روی کار آبی و دقت این روش دارد. اگر این طول خیلی کوچک باشد ممکن است که تعداد کافی ذرات در ناحیه تاثیر ذره مرکزی وجود داشته باشد که باعث کاهش دقت نتایج می شود اگر طول هموار زیاد باشد تمام جزئیات ذرات و خصوصیت های محلی ممکن است از حالت هموار خارج شوند که تاثیر

منفی در نتایج خواهد داشت و در این صورت تعداد ذرات واقع در ناحیه تاثیر ذره مرکزی و حجم محاسبات افزایش خواهند یافت بنابراین در انتخاب این پارامتر دقت زیادی به خرج داد طول هموار به طور مستقیم با چگالی سیال در ارتباط است و برای مسائلی که در آن ها سیال تراکم پذیر فرض شود این طول در زمان های مختلف تغییر خواهد کرد و همچنین اگر چگالی سیال در مکان های مختلف نیز متفاوت باشد این طول نسبت به مکان نیز میتواند تغییر کند در سیال هایی که تراکم ناپذیر هستند و همچنین چگالی سیال در نقاط مختلف برابر است می توان یک طول هموار ثابت برای تمام نقاط و تمام زمانها در نظر گرفت باتوجه به این که سیال در نظر گرفته شده در این تحقیق آب است که تراکم ناپذیر است طول هموار ثابت و $1/2$ برابر فاصله بین ذرات در نظر گرفته شده است که از نتایج آزمایش های عددی برای مسائل مختلف به دست آمده است.

پیدا کردن ذرات موجود در ناحیه تاثیر هر ذره در اغلب مسائل جریان با سطح آزاد موقعیت ذرات در زمان های مختلف نسبت به هم در حال تغییر است در روش هیدرو دینامیک ذرات هموار شده به منظور گسسته سازی معادلات حاکم، ذرات واقع در ناحیه تاثیر هر ذره باید مشخص باشد، بنابراین در هر گام زمانی باید ذرات مجاور هر ذره را معین کرد. بدین منظور باید فاصله تمام ذرات را نسبت به هر ذره محاسبه کرده و سپس ذرات واقع در ناحیه تاثیر هر ذره را پیدا کرد. اگر تعداد ذرات برابر با N باشند، تعداد N^2 محاسبه نیاز خواهد بود که در مسائل با تعداد زیاد ذرات بسیار زمان بر است. روش های گوناگونی برای کاهش تعداد محاسبات برای یافتن ذرات واقع در ناحیه تاثیر هر ذره پیشنهاد شده است که در این قسمت روش لیست های مرتبط شده (Linked list) که توسط موناگان (۱۹۹۲) معرفی گردیده است تشریح می شود.

شرایط مرزی

دیواره نفوذناپذیر

دیواره نفوذناپذیر با تعریف یک ردیف ذره با موقعیت ثابت بر روی مرز شبیه سازی شده اند. به منظور اعمال شرایط مرزی نیومن^{۳۰} معادله لاپلاس برای این ذرات نیز مورد حل قرار می گیرد از طرفی برای اطمینان از صحت محاسبه چگالی این ذرات و در نظر گرفته نشدن آن ها به عنوان ذرات سطح آزاد، چند ردیف ذره در خارج آن ها به عنوان ذرات مجازی^{۳۱} در نظر گرفته شده است. تعداد ردیف های این ذرات بستگی به مقدار پارامتر طول هموار دارد در مدل حاضر با توجه به اینکه $h=1.2*dr$ است، دوردیف ذرات مجازی به طور ثابت و عود بر ذرات دیواره در نظر گرفته شده است (عطایی اشتیانی و همکاران، ۲۰۰۸) به منظور محاسبه هد آبی ذرات مجازی، شرایط مرزی برای این ذرات اعمال شده است به عبارت دیگر هد یک ذره مجازی با هددوره جامدی که در راستای عمود بر مرز دیواره قرار دارد، یکسان فرض شده است.

مرز با هد مشخص

برای ذرات واقع در مرز با هد مشخص، شرایط مرزی در بخله^{۳۲} اعمال شده است. بدین معنی که برای این ذرات هد مشخص در نظر می گیریم و معادله لاپلاس را نیز دیگر برای این مرزها حل نمی نمائیم. برای محاسبه صحیح چگالی این ذرات، برای آن ها نیز دو لایه ذرات مجازی لحاظ شده است.

ساختار مدل عددی تهیه شده

با توجه به توضیحات داده شده در بخش الگوریتم حل معادلات، نمودار گردش مدل عددی تهیه شده در شکل ۳- نمایش داده شده است با توجه به این الگوریتم که عددی با نرم افزار فورترن ۹۰ در برنامه مترجم Compaq Visual Fortran 6.1^{۳۳} تهیه شده است.

مدل سازی عددی نشت در پی سد بتنی بدون دیوار آب بند

مسئله ای که در ابتدا جهت صحت سنجی مدل عددی در شبیه سازی پدیده نشت در محیط های خاکی مورد استفاده قرار گرفته است مدل سازی عددی تراوش و نشت در پی خاکی سد بتنی است. همان طور که می دانیم تحلیل پدیده نشت در پی سد بتنی از اهمیت بالایی در تحلیل پایداری این نوع سد برخوردار است به نحوی که محاسبه نیروی زیر فشار^{۳۴} که از نیروهای بسیار مهم در تحلیل پایداری سد بتنی است، با استفاده از بررسی پدیده نشت در پی سد بتنی امکان پذیر است.

نمونه ای که جهت صحت سنجی مدل عددی در این بخش در نظر گرفته شده است دارای مشخصات فیزیکی ذیل است:

۱- مصالح پی سد بتنی در نظر گرفته شده از جنس رس اشباع می باشند؛

³⁰ Neuman boundary condition

³¹ Dummy particles

³² Diridler

³³ Compiler

³⁴ Uplift

۲- مصالح خاکی در نظر گرفته شده همسان و همگن می باشند؛

۳- ضریب نفوذپذیری مصالح رسی پی 10^{-8} متر بر ثانیه است؛

۴- طول قاعده سد بتنی، ۳۶ متر در نظر گرفته شده است؛

۵- پی سد بتنی دارای ۱۰۰ متر طول و ۱۲ متر ارتفاع است؛

۶- تراز آب مخزن سد به ارتفاع ۵ متر در نظر گرفته شده است؛

۷- پدیده نشست در این پی سد بتنی پس از آبیگری سد و در شرایط جریان دائمی در نظر گرفته شده است.

همان طور که در بخش های قبل نیز اشاره شده است جهت سنجی داده های مدل عددی توسعه داده شده هیدرودینامیک ذرات هموار شده از نرم افزار SEEP/W که از زیرمجموعه های نرم افزار GEOSLOPE2000 است، استفاده گردیده است. نرم افزار SEEP/W یک نرم افزار مدل سازی عددی پدیده نشست بر اساس روش اجزای محدود است که به طور گسترده جهت کارهای عملی و پژوهشی استفاده می گردد در ادامه مروری مختصر بر شیوه مدلسازی پدیده نشست در این نرم افزار صورت می پذیرد و سپس شبیه سازی مسئله مزبور با کد عددی هیدرودینامیک ذرات هموار شده تشریح می گردد و نتایج دو مدل جهت سنجی که عددی توسعه یافته داده شده مقایسه می گردند.

مدلسازی با استفاده از نرم افزار SEEP/W

تعریف مشخصات مدل

به منظور آنالیز حرکت آب در خاک در مسئله موجود، ابتدا باید شرایط مسئله را به نرم افزار معرفی کرد این شرایط که در منوی keyIn نرم افزار تعریف می شوند شامل موارد ذیل می باشند:

۱- دائمی و غیردائمی بودن در زیرمنوی Analyses ؛

۲- معرفی نفوذپذیری و توابع آن در زیرمنوی Hydraulic Functions ؛

۳- معرفی مصالح خاکی پی سد در زیر منوی Materials ؛

۴- تعریف شرایط مرزی در زیرمنوی Boundary Conditions .

تعریف سه مدل و شبکه بندی محدوده جریان

پس از مرحله تخصیص مشخصات به مدل، هندسه ناحیه مورد مطالعه برای برنامه تعریف می شود این کار در منوی Draw نرم افزار صورت می پذیرد که ابتدا نقاط، سپس خطوط و در نهایت ناحیه ها به مدل معرفی می شوند .

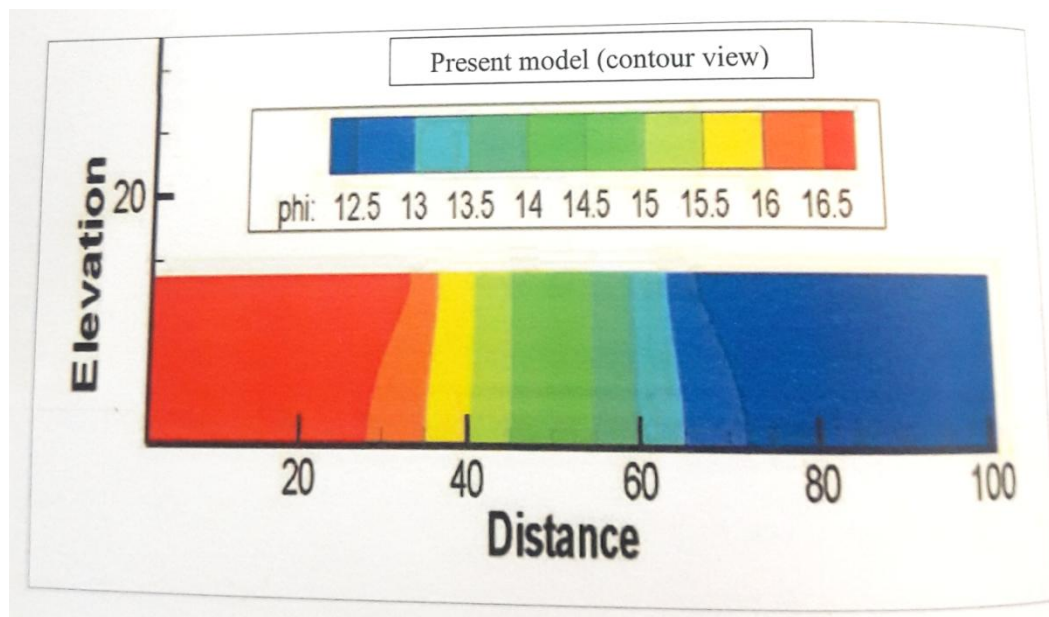
مدل سازی با استفاده از مدل مبتنی بر روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده

پارامترهای مدل سازی مسئله

در این مدل سازی فاصله اولیه بین ذرات ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است تعداد کل ذرات در نظر گرفته شده برای بیان پی ۴۸۰۰ (۲۴×۲۰۰) ذره است که به شکل یک شبکه مربعی در صفحه قائم به طور منظم در کنار یکدیگر قرار داده شده اند. مرزهای نفوذناپذیر کف پی و قاعده سد توسط ۴۰۰ ذره نشان داده شده اند و تعداد ۲۹۸۴ ذره مجازی نیز در نظر گرفته شده است همچنین در این محاسبات چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، طول هموار ۰/۶ متر (۱/۲ برابر فاصله بین ذرات) در نظر گرفته شده اند. هد اولیه برای ذرات واقع در مرزها مطابق با توجه به شرایط در نظر گرفته شده برای بالادست و پایین دست بدنه سد به ترتیب ۱۷ و ۱۲ متر اختصاص داده شده است.

نتایج مدل سازی

با توجه به پارامترهای معرفی شده در قسمت قبل، مسئله نشست جریان از پی خاکی سد بتنی بدون دیواره آب بند با استفاده از مدل SPH حل شده است در شکل زیر نتایج مدل سازی این مسئله شامل بار آبی (هد) مدل موجود و نتایج مدل SEEP/W نمایش داده شده است.

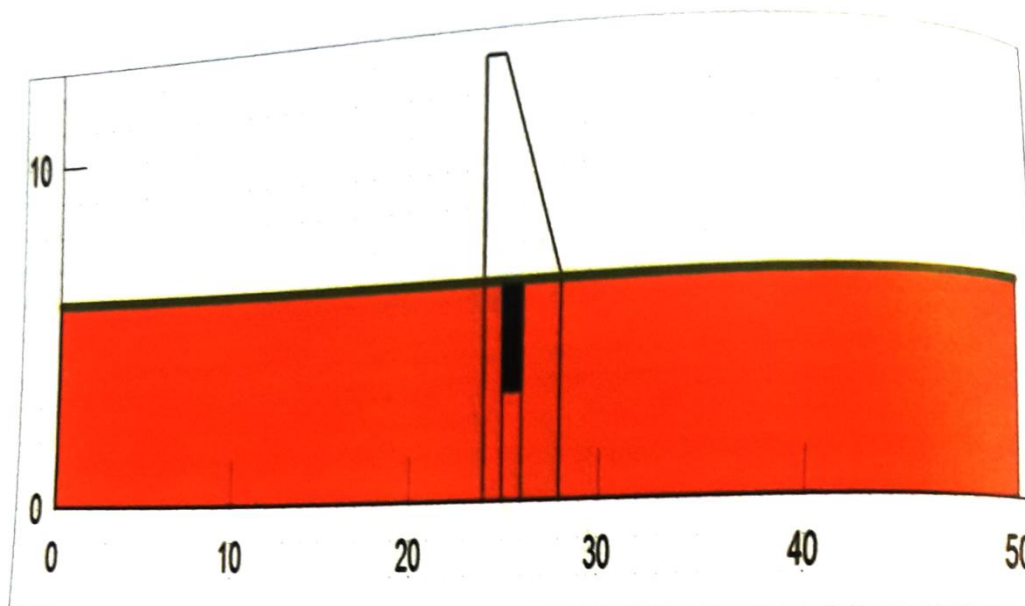


مدل سازی عددی نشت در پی سد بتنی همراه با دیوار آب بند

همان طور که در بخش قبل مشاهده شد، نشت در پی خاکی سد بتنی بدون دیوار آب بند مدل سازی شده و نتایج محاسباتی مطابقت بسیار خوبی با نتایج نرم افزار SEEP/W مبتنی بر روش اجزا محدود داشتند در این بخش برای بررسی اثرات دیوار آب بند در کاهش دبی نشت، پی سد بتنی به همراه دیوار آب بند مدل سازی شده است. به دلیل محدودیت های روش های مبتنی بر شبکه بندی در اندازه شبکه، مدل سازی هندسه های پیچیده مثل گوشه های دیوار آب بند دشوار است در حالی که روش های بدون شبکه، به ویژه روش های بدون شبکه مبتنی بر ذرات به دلیل نداشتن محدودیت اندازه شبکه که در روش های وابسته به شبکه بندی میدان جریان وجود دارد قادر به مدل سازی هندسه های پیچیده می باشند.

نمونه ای که جهت صحت سنجی مدل عددی در این بخش در نظر گرفته شده است، دارای مشخصات فیزیکی ذیل است:

- ۱- مصالح پی سد بتنی در نظر گرفته شده، از جنس رس اشباع می باشند؛
 - ۲- مصالح خاکی در نظر گرفته شده همسان و همگن می باشند؛
 - ۳- ضریب نفوذپذیری مصالح رسی پی، 10^{-5} متر بر ثانیه است؛
 - ۴- ضریب نفوذپذیری مصالح در نظر گرفته شده برای دیوار آب بند، 10^{-7} متر بر ثانیه است؛
 - ۵- طول قاعده سد بتنی ۴ متر در نظر گرفته شده است؛
 - ۶- پی سد بتنی دارای ۵۰ متر طول و ۶ متر ارتفاع است؛
 - ۷- تراز آب مخزن سد به ارتفاع ۵ متر در نظر گرفته شده است؛
 - ۸- پدیده نشت در این پی سد بتنی پس از آبیگری سد و در شرایط جریان دائمی در نظر گرفته شده است.
- شرایط هندسی این مسئله در شکل زیر نمایش داده شده است در این بخش نیز همانند بخش قبل برای صحت سنجی نتایج مدل SPH از نرم افزار SEEP/W استفاده شده است.



شکل شرایط هندسی مسئله نشت در پی با در نظر گرفتن دیوار آب بند

مدلسازی با استفاده از مدل مبتنی بر روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده پارامترهای مدلسازی مسئله

درمدلسازی مسئله مطرح شده فاصله اولیه بین ذرات ۰/۲ متر در نظر گرفته شده است. تعداد کل ذرات سیال درمدل سازی این مسئله ۹۱۳۴ ذره بوده و دیواره ها با ۵۲۶ ذره مدل سازی شده اند.

چینش ذرات این مسئله به صورت یک شبکه مربعی است که ذرات در ابتدا مانند مسئله ی قبل قرار گرفته اند همچنین درمحاسبات این مسئله، چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و طول هموار ۰/۲۴ متر (۱/۲ برابر فاصله ی بین ذرات) درنظر گرفته شده اند. هداولیه برای ذرات واقع در مرزها مطابق با توجه به شرایط در نظر گرفته شده برای بالادست و پایین دست بدنه سد، به ترتیب ۱۱ و ۶ متر اختصاص داده شده است.

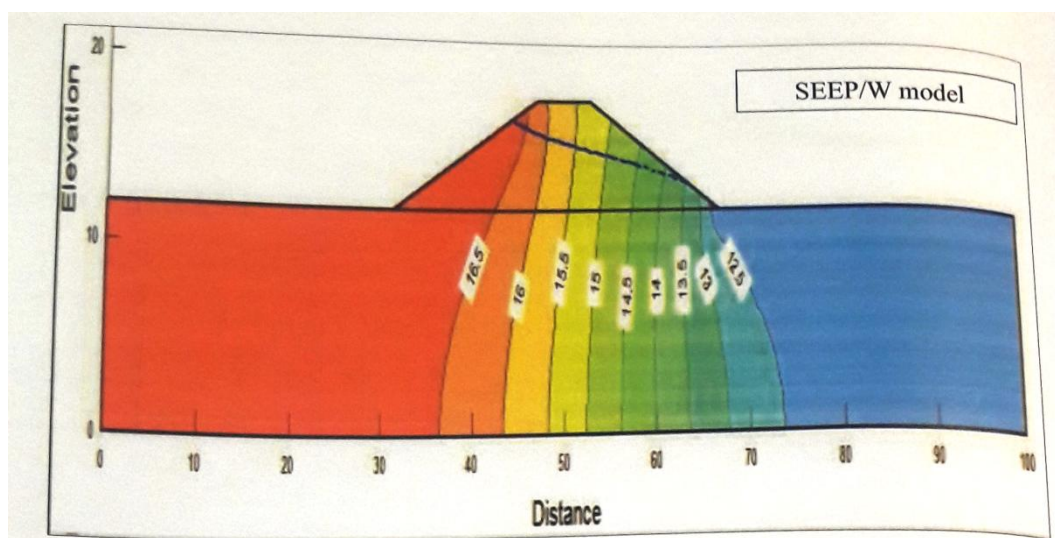
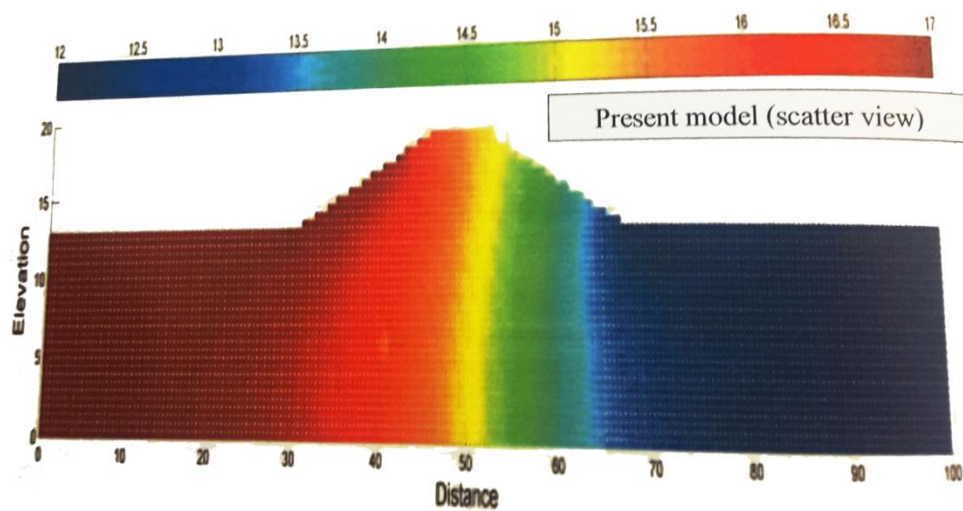
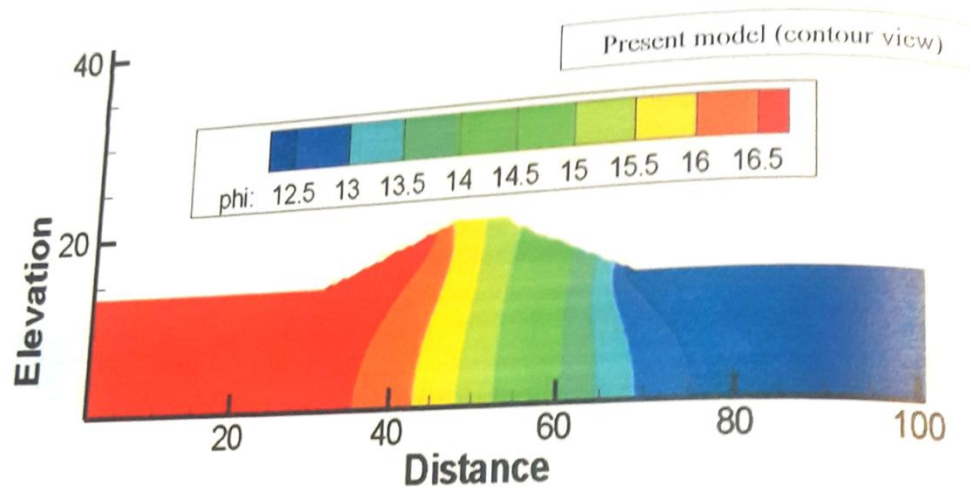
مدل سازی با استفاده از مدل مبتنی بر روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده پارامترهای مدلسازی مسئله

دراین مدل سازی فاصله اولیه بین ذرات ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است تعداد کل ذرات در نظر گرفته شده در این مدل سازی ۶۴۸۲ ذره است تعدادذرات مجازی در نظر گرفته شده برای محاسبه صحیح چگالی ذرات ۷۷۶ ذره است و مرزهای نفوذناپذیر کف پی توسط ۲۰۰ ذره نشان داده شده اند.

پی سد خاکی با ۴۸۰۰ ذره وبدنه آن با ۵۰۶ ذره بیان شده اند در بیان ذرات بدنه سد، ابتدا ذرات دریک شکل مربعی قرار گرفته اند و سپس ذرات بالاتر از شیب های دو طرف حذف گردیده اند همچنین در این محاسبات چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ، طول هموار ۰/۶ متر (۱/۲ برابر فاصله ی بین ذرات) در نظر گرفته شده اند. هد اولیه برای ذرات واقع در مرزها مطابق با توجه به شرایط در نظر گرفته شده برای بالادست و پایین دست بدنه سد، به ترتیب ۱۷ و ۱۲ متر اختصاص داده شده است.

نتایج مدل سازی

در شکلهای زیر نتایج مدلسای شده حرکت آب در پی و بدنه سد خاکی درشرایط محیط همگن و همسان به وسیله مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده توسعه داده شده شامل هد آبی ذرات و مقایسه با نتایج نرم افزار SEEP/W نشان داده شده است.



شکل -مقایسه خطوط هم پتانسیل در مسئله نشت جریان از پی و بدنه سد خاکی با استفاده از مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده و نرم افزار SEEP/W (واحدهای طولی و عرضی و هد آبی متر است).

همان طور که در این شکل مشهود است، خطوط پتانسل در این حالت که بدنه و سد خاکی نیز به طور پیوسته در نظر گرفته شده اند، با دقت بالایی درمقایسه با نرم افزار SEEP/W مدل شده است.

جمع بندی

در این مقاله به منظور مدل سازی عددی نشت جریان در محیط های خاکی، به عنوان یکی از مهمترین جریان ها در محیطه ای خاکی ازجمله سدهای خاکی، با استفاده از برنامه نویسی در نرم افزار فرترن، مدل عددی دو بعدی نوبتی که قادر به مدلسازی مسائل مختلف نشت جریان در محیط های خاکی با هر شرایط هندسی و اولیه دلخواه باشد، با بهره گیری از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده تهیه شد. محیط های خاکی در نظر گرفته شده همگی به صورت همسالان و همگن در نظر گرفته شدند و به همین دلیل از معادله لاپلاس به عنوان معادله حاکم بر مسائل این تحقیق استفاده گردید. به منظور صحت سنجی و ارزیابی دقت مدل عددی تهیه شده مسائل مختلف نشت در محیطهای خاکی، شامل مسئله ی نشت جریان از پی سد بتنی بدون و با دیوار آب بند و نشت جریان از بدنه و پی سد خاکی به صورت یکپارچه مدل سازی شد و در هر یک از آن ها نتایج موفقیت آمیزی حاصل شد. در این بخش نتیجه های به دست آمده در راه عملکرد روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده در مدل سازی عددی نشت جریان در محیط های خاکی و همچنین پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه گشته است.

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در روند بررسی های صورت گرفته در این تحقیق به شرح زیر است:

- روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) قابلیت مدلسازی خصوصیات جریان در محیطهای خاکی را با دقت بالا دارا است.
- سرعت انجام محاسبات در کارها و مسائلی که در آنها از روش های حل عددی استفاده می شود به علت وجود تعداد محاسبات بسیار بالا برای حصول به جواب نهایی که در بسیاری از موارد دارای الگوریتم پیچیده ریاضی نیز است، از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد
- استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده میزان سرعت محاسبات و رسیدن به جواب را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد.
- شکل هندسه مسئله مورد بررسی، منظم و یا غیر منظم بودن، داشتن زوایای متفاوت در هندسه طرح و دیگر پارامترهایی که باعث به وجود آمدن شکلی با هندسه پیچیده برای مدلسازی و وارد شدن در محاسبات عددی می شود و از موارد غیر مطلوب در اغلب روش های شبکه بندی و محاسباتی است ولی استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده به عنوان یکی از روش های بدون شبکه، امکان مدلسازی هندسه های پیچیده را فراهم می آورد که آزمایشی بسیار با اهمیت به کارگیری این روش است.
- با توجه به مقایسه جواب های مدل SPH تهیه شده با جواب های نرم افزار بسیار پرکاربرد SEEP/W و تطابق بسیار خوب نتایج خطوط هم پتانسل دو مدل با یکدیگر و خطای حدود، ۱۰ درصدی در نتایج دبی نشت، می توان روش SPH را به عنوان یکی از روش های مناسب برای مدل سازی نشت در محیط های خاکی به حساب آورد.

منابع و مراجع

- [۱] رحیمی، حسن، ۱۳۹۲ سدهای خاکی (ویرایش چهارم) تهران. موسسه انتشارات دانشگاه تهران
- [۲] شمسانی، ابوالفضل ۱۳۸۱ هیدرولیک جریان آب در محیط متخلخل جلد دوم مهندسی آب های زیرزمینی تهران انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۳] قدسیان، مسعود ۱۳۸۲، هیدرولیک سد تهران: دفتر نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس
- [۴] وفائیان، محمود، ۱۳۸۹ سدهای خاکی (ویرایش دوم) اصفهان، مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان
- [5] Ataie-Ashtiani. B., Shobeiry, G., Farhadi, L., 2008. Modified Incompressible spi 1 method for simulating free surface problems, Fluid Dynamic Research, 40, 637-661.
- [6] Association of State Dam Safety Officials. (2004, July 134-15). Seepage for Earth Seminar. Dams. First Advanced Technical
- [7] Boyer, Douglas D. 2003, November 44-6). Seepage and Internal Erosion Characterization and Processes. Safety Evaluation of Existing Dams Seminar. U.S. Bureau of Reclamation.
- [8] Cedergren, Harry R. .1997. Seepage, Drainage and flow nets. (Third Edition) .New York: Wiley.
- [9] Colagrossi, A., Landrini, M. 2001 Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics, journal of Computation h rt al Physics, 191, 448-475.
- [10] Dom, R., Cleary, P.W. .2008. Modelling 3D fracture and fra mentation in a thin g plate under high velocity projectile impact using SPH. ERCOFTAC SIG SPHERIC IIIrd International workshop, Lausanne, Switzerland, 215-219.
- [11] Engemoen, William O..2003, November 4-6). Assessing the Risk of a Seepage-Related. Dam Failure By Means of Failure Mode Identification, Risk Analysis, and Monitoring Practices. Safety Evaluation of Existing Darns Seminar. U.S. Bureau of Reclamation.
- [12] Fell, R., Foster, M. .2000, October 1749). Seepage through Dams and Their Foundations, ASDSO4TEMA Workshop.
- [13] Ferrari, A., Dumbser, M., Toro, ET. .2009. Armanini, A. A new 3D parallel SPH scheme for free surface flows, Computers & Fluids, 38, 1203-1217.
- [14] Graham, Andrew. .1997. University of Durham, website at <http://www.dunac.uldAesOwww4icalidamsifouniseep4.htm>
- [15] Gray, J.P., Monaghan, J.J., Swift R.P. .2001. SPH elastic dynamics. Computer calculations of flow through an orifice conduit, ERCOFTAC SIG SPHERIC Iind International workshop, Madrid, Spain, 32-36.
- [16] Liu, G.R. .2003. mesh free methods, New York: CRC press.
- [17] Lucy, LB. .1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. Aston 1, 82 (12), 1013-1024.
- [18] Monaghan, .1992, Smoothed particle hydrodynamics. Annu RevAstron Astrophys, 30, 543w574.
- [19] methods in applied mechanics and engineering, 190, 6641 -6662.
- [20] Han-. NI a .1962, Groundwater and Seepage. NewYork: McGraw-Hill.
- [21] Issa, R11 Violeati, De9 Thibault, a .2008. 11PC for Spartacusi-3D SPH code and ERCOFTAC SIG SPHERIC mrd applications to real environmental flows, international workshop, Lausanne, Switzland, 121.-126.
- [22] Klapp, J., Sigalotti, L.D.G., Galindo, S., Dura , . 2007. Numerical 19. Monaghan, J.J. .1994. Simulating free surface flows with SPH, Journal computational Physics, 110, 399-406
- [23] Monaghan, J.J. .1 997. SPH and Riemann solvers. Journal of Computational Physics, 136, 298-.307.
- [24] Monaghan, J.J. .1 997. SPH and Riemann solvers. Journal of Computational Physics, 159, 290-.311.
- [25] Monaghan, J.J., Kos, A. .1999. Solitary waves on a cretan beach, Journal of Physics, 159, 290-311. waterway, port, coastal, and ocean engineering, 125 (3), 145-154.
- [26] Monaghan, J.J. .2005. Smoothed particle hydrodynamics. reports on pro physics, 68,1703-1759.

- [27] Muskat , M. .1946. Flow of Homo Fluids through Porous Media. London, Arm Arbor.
- [28] Patsis, P.A, Athanassoula E..2000. SPH simulations of gas flow in barred galaxies. Effect of hydrodynamical and numerical parameters. Astronomy and Astrophysics, 358, 45-56.
- [29] Potapov S., Maurel, B., Combeseure, A. .2008. SPH framework to model fluid , shell interactions. ERCOFTAC SIG SPHERIC IIIrd International workshop, Lausanne, Switzland, 162-167.
- [30] Rogers, RD., Dalrymple, R.A. .2004. SPH modeling of breaking waves, Proc. 29th Intl. Conference on Coastal Engineering Journal, World Scientific Press, 415-427.
- [31] Safdari Shadloo, M., Zainali, A., Sadek, S.1-1., Yildiz, M. .2010. Improved Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Simulating Flow around Bluff Bodies, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, 200, 1008-1020.
- [32] Shao, S. .2010. Incompressible SPH flow model for wave interactions with porous media, Coastal Engineering Journal, 57, 304-316.
- [33] Stateler, J. 2003, November 4-6). Failure Mode Analysis for Darn Safety Monitoring and Evaluation and Instrumentation's Role in Darn Safety. Safety Evaluation of Existing Dams Seminar. U.S. Bureau of Reclamation.
- [34] Terzahi ,. K. 1956, Theorciical soil mechanics.. New York: Wiley,
- [35] US. Bureau ol Rcelamation. 1987. Dcsign of Small Dams. (Third Edition) Waishintlion D.C.: U.S. Govcrnmcnt Printing office.
- [36] Violeau , D., Issa, R. .2008. Numerical modelling of complex turbulent free-urface Flows with the SPII method: an overview. International Journal for Numerical Methr, in rngein53,277-304.
- [37] VioleaLL D., Issa, R., Benhamadouche, S., Chorda, J. Maubourguet, M. M. 2008 Modeling a fish passage with SPH and Euierian codes: the influence of turbulence closure ERCOFTAC SIG SPHERIC IIrd International workshop, Lausanne, Switzland, 85-92.
- [38] Welton, W.C. .1998. Twodimentional PDF/SPH simulations of compressible turbulence flows, Journal of Computational Physics. 139, 410-443.