# ارائه یک روش عددی جدید برای حل معادلات سنت ونانت

**محمد هوشمندزاده ، حسین هوشمندزاده**

**کارشناس مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز و عضو باشگاه پژوهشگران جوان**

**دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر**

hooshmandzadeh_civil@yahoo.com

## چکیده

در جریان های غیر دائمی ، سرعت و عمق جریان در هر لحظه در طول مسیر تغییر می کند. برای بیان خصوصیات این جریان ها از معادلات سنت ونانت استفاده می شود. چون این معادلات از نوع دیفرانسیل هذلولوی مرتبه اول غیر خطی هستند لذا حل آنها در حالت عادی امکان پذیر نبوده ، بلکه بایستی با استفاده از یکسری شرایط و فرضیات اقدام به حل آن نمود. در این مقاله کوشش شده است تا روشی جدید برای حل این معادلات ارائه نمود. نتایج بدست آمده با واقعیت مقایسه شدند که از این جهت بطور قابل توجهی رضایت بخش بوده اند.

**کلید واژه ها: دیفیوژن ، دینامیکی ، ثقلی ، سنت ونانت ، مانینگ**

### ۱- مقدمه

بسیاری از مسائل هیدرولیک ، با فرض جریان های دائمی تحلیل می شوند. درجریانهای دائمی ، دبی جریان ثابت فرض می شود. ولی در عمل در بسیاری از موارد اینگونه نیست . بلکه جریان ها بصورت غیر دائمی هستند یعنی در آنها دبی و سطح مقطع جریان یا زوج عمق و سرعت در هر نقطه تغییر می کنند. پس برای تحلیل این نوع جریان ها می بایست در هر نقطه مشخصات جریان را بدست آورد. برای این کار از معادلات سنت ونانت استفاده می شود. به دلیل اینکه این معادلات پیچیده هستند لذا از روش های عددی برای حل آنها استفاده می شود.هر جریان غیردائمی در حقیقت عبارت است از حرکت یک موج که با تغییر مکان خود و بر حسب شرایط ، عمق جریان یا دبی و یا هر دو را از مقطعی به مقطع دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر می دهد. امکان دارد این تغییرات بر اساس برنامه طراح و یا به دلیل حوادث اتفاقی و بصورت ناخواسته رخ دهد. طبق تعریف ، یک موج عبارت است از یک تغییر موقت در سطح آب که توسط سیال انتشار می یابدو سرعت آن عبارت است از سرعت انتشار چنین آشفتگی نسبت به سیال. امواج در کانال های باز به چهار دسته تقسیم می شوند:۱ موج های دینامیکی ۲-موج های ثقلی ۳- موج های دیفیوژن

۴- موج های سینماتیک

نمونه هایی از جریان های غیر دائمی را می توان در هیدرولیک دریاها و رودخانه ها به شکل امواج نوسانی یا جزر و مد اقیانوس ها مشاهده نمود. سیلاب ناشی از شکست سدها نیز یک نوع جریان غیر دائمی بوده که می تواند خسارات فراوانی به تاسیسات مهم پایین دست خود مانند نیروگاهها و نواحی مسکونی وارد نماید.

### ۲- معادلات سنت ونانت

اعتقاد بر این است که روابط پیوستگی و اندازه حرکت برای بیان جریان ناپایدار در کانال ها ، نخستین بار در سال ۱۸۷۱بوسیله سنت ونانت فرانسوی تعمیم یافتند. این معادلات ، دیفرانسیل جزئی شبه خطی( به دلیل اینکه پارامترهای فضا و زمان در تجزیه و تحلیل این نوع جریان ها دخالت دارند) از مرتبه اول و نوع هذلولوی بوده که باید بطور همزمان حل شوند. چون حل تحلیلی آنها در شرایط عادی امکان پذیر نیست لذا با استفاده از یک سری فرضیات ساده کننده وشرایط اولیه و مرزی باید نسبت به حل آنها اقدام نمود.به این نوع معادلات ، دوتایی (کوپله) گفته می شود. وو و مولیناس [1] مزایا و معایب روش حل همزمان معادلات را بصورت زیر بیان نموده اند:۱-در روش کوپله می توان از گام های زمانی طولانی تری استفاده کرد. ۲- اگر کانال خیلی فعال باشد روش کوپله ، نتایج بهتری به همراه دارد. ۳- فرمول سازی و گسسته سازی حل کامل در روش کوپله دارای زحمت بیشتری است و در عین حال دقیقتر نیز است .

۱-۲- فرضیات مورد استفاده در بدست آوردن معادلات سنت ونانت

این فرضیات عبارتند از :

۱- توزیع فشار بصورت هیدرواستاتیک است. ۲- شیب طولی آبراهه اندک است. ۳- توزیع سرعت در کل مقطع عرضی یکنواخت می باشد. ۴- آبراهه منشوری است. ۵- برای محاسبه افت بار از فرمول های شزی یا مانینگ استفاده می شود.

---

[1] -Wu and Molinas

### ۳- انواع روش های حل معادلات سنت ونانت

حل معادلات سنت ونانت به روش تحلیلی فقط در شرایطی امکان پذیر است که حالات بسیار خاص و محدودی از امواج که بتوان معادلات مذکور را با فرضیاتی ساده نمود وجود داشته باشد. روش های ترسیمی به دلیل احتیاج به وقت طولانی ، اخیراً کمتر مورد توجه قرار گرفته اند . با توسعه رایانه و امکان استفاده از سرعت های بالای آنها در حل معادلات پیچیده ، روش های عددی به تدریج جای سایر روش ها را گرفته و به ویژه امکان اعمال عوامل و شرایط بیشتر و از سوی دیگر همزمان با آن ، دسترسی به نتایج و جوابهای نسبتاً دقیق ، سبب شده است که روش های دیگر تدریجاً کنار گذاشته شوند.برای حل این معادلات به روش عددی ، تکنیک های مختلفی وجود دارد که هر کدام از منظر همگرایی ، ثبات ، دقت و بازدهی ، مزایای مخصوص به خود را داشته و می توانند به صورت زیر تقسیم بندی شوند:

۱- روشهای تقریبی

بر روی معادله پیوستگی و معادله خلاصه شده حرکت پایه ریزی شده اند. از جمله این موارد می توان به روندیابی مخزن ، موج سینماتیک ، دیفیوزن آنالوزی و روش ماسکینگام[1] اشاره کرد.

۲- روش های عددی

هدف آنها عبارت است از حل معادلات مربوطه از طریق مدل عددی . از جمله مهمترین روش های عددی حل معادلات سنت ونانت ، روش خطوط مشخصه [2] می باشد که در سال ۱۷۸۹ مونژ[3] آن را پایه گذاری نمود. در روش خصوصیات ، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به دو جفت معادلات دیفرانسیل معمولی که مشخصات و خصوصیات جریان را مشخص می نمایند ، تبدیل شده و سپس از طریق روش اختلافات محدود(تفاضل متناهی)حل می شوند. در روش اختلافات محدودیا روش مستقیم ، مشتقات جزئی با اختلافات محدود تعویض شده و معادلات جبری حاصله حل می گردند. برای استفاده از روش اجزا محدود ، سیستم به تعدادی جز کوچک تقسیم شده و از معادلات دیفرانسیل جزئی در گره های مربوط به هز جز انتگرال گیری می شود. روش اختلافات محدود ، خود به دو روش صریح و ضمنی تقسیم می شود. در روش صریح ، معادلات جبری حاصله خطی بوده و متغیرهای وابسته بطور صریح و در انتهای هر محدوده زمانی ، استخراج می شوند. در حالی که در روش ضمنی (غیر صریح) ، معادلات جبری عموماً غیر خطی بوده و متغیرهای مربوطه به شکل ضمنی محاسبه می شوند. البته در هنگام انجام محاسبات به شرایط اولیه نیاز است تا بتوان مقادیر مجهولات را در ابتدای هر محدوده زمانی مشخص نمود.از جمله دیگر این روش ها ، می توان به روش ، عناصر متناهی ، طیفی و عناصر مرزی اشاره نمود.

۳-۱-روشهای تفاضل محدود

با توجه به اینکه تفاضل محدود یکی ازروشهای عددی کامل حل معادلات سنت و نانت می‌باشد، لذا در این بخش کوشش می شود تامبانی این روش مورد بررسی قرار گیرند. در این روشها، رابطه پیوستگی همراه با کلیه عبارات معادله اندازه حرکت به کارمی روند. لذا دقت این روش هابیشتر از روشهای تقریبی است.بسیاری از مسائل مهم علمی و مهندسی درحیطه معادلات دیفرانسیل قرار میگیرند. به عبارت دیگر بسیاری از پدیده های فیزیکی را می توان به وسیله معادلات دیفرانسیل مدل سازی نمود. وقتی که تابع مورد مطالعه شامل دو یاچند متغیر مستقل می شود، معمولاً معادله دیفرانسیل مربوط به آن یک معادله دیفرانسیل پاره ای خواهد بود. اکثر معادلات حاکم بر دینامیک سیالات، انتقال حرارت، حرکت و آلودگی آبهای زیرزمینی به صورت معادلات دیفرانسیل پاره ای مرتبه دوم بیان می گردند. به دلیل اینکه فقط بخشی از این گونه مسائل را می توان به روش تحلیلی حل کرد باید پذیرفت که روش حل این گونه معادلات تقریباً به حل عددی محدود می شود.چون توابع چند متغیره پیچیده تر ازتوابع یک متغیره می باشند، حل معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE) یکی از چالش های روشهای عددی می باشد. برخی ازPDE های مهم و پدیده های فیزیکی مربوط عبارتند از: ۱- معادله موج با سه بعد مکان (x,y,z) و یک بعد زمانی (t) . ۲-معادله حرارت. ۳-معادله لاپلاس. ۴-معادله پریسون. ۵-معادله هارمونیک مرتبه چهار ۶- معادلات ناویر - استوکس علاوه براینها می توان مثالهای دیگری از مکانیک کوانتومی ، الکترومغناطیس ، هیدرودینامیک ، کشسانی و ... بیان کرد.معادلات ناویر- استوکس مثال بسیارپیچیده ای است که شامل دو معادله دیفرانسیل همزمان می باشد. برای مشخص کردن جواب معادله دیفرانسیل پاره‌ای،شرایط دیگری را بایستی برای تابع جواب تعریف نمود.عموماً این شرایط به صورت مقادیر مرزی روی تمام یا بخشی از محیط ناحیه ای که جواب معادله در آن ناحیه مورد نظراست می باشند. طیف مرزها و شرایط مرزی ازعوامل تعیین کننده چگونگی معادلات دیفرانسیل است. انواع شرایط مرزی عبارتند از:۱-شرایط مرزی دیرشیله: مقدار متغیر وابسته روی مرزها مشخص می شود. ۲-شرایط مرزی نومن: مشتق عمومی متغیر وابسته در مرزها معلوم می شود. ۳-شرط مرزی رابین: ترکیب خطی از شرط مرزی دیریشله و نومن می باشد. ۴-شرط مرزی مختلف: در برخی موارد، در بخشی از یک مرزشرط دیرشیله و در قسمت دیگر آن شرط نومن برقراراست.برای انجام عملیات حل عدد، صرفنظر ازروش حل، بایستی مراحل زیر صورت گیرد:۱-تعریف حوزه عمل. ۲- شبکه بندی حوزه حل مساله. ۳- بدست آوردن معادلات جبری (منقطع کردن معادله). ۴-حل دستگاه معادلات جبری حاصل به روش های معمول و یا تکرار کننده.

تفاوت روشهای حل عددی در بخش منقطع کردن و تاحدودی اندازه شبکه بندی حوزه حل می باشد. در غیر این صورت، تعریف حوزه عمل و حل دستگاه معادلات جبری در آنها یکسان می باشد.

[1]-Muskingum
[2]-Method of Characteristics
[3]-Monge

### ۳-۲-انواع معادلات دیفرانسیل پاره ای و مرتبه دوم

از انواع این معادلات می توان به معادلات بیضوی، سهمومی،هذلولوی اشاره کرد.تمایز این معادلات به ضرایب عبارت های مستقل درجه ۲ دارد.تقسیم بندی دیگراز معادلات دیفرانسیل پاره ای، آنها را به دودسته خطی و غیرخطی تقسیم می کنند. در معادلات خطی، متغیر وابسته و مشتقات آن به صورت خطی وارد می شوند. ولی درمعادلات دیفرانسیل غیرخطی، حاصل ضریب متغیرهای وابسته و یا مشتقات آنها دیده می شود.

### ۳-۳-کاربرد تفاضل محدود درحل معادلات دیفرانسیل پاره ای

یکی ازروشهای حل تمام انواع معادلات دیفرانسیل پاره ای، جایگزین نمودن مستقل ها یا تفاضل های محدود است. سپس، معادله تفاضل ها برای هر گره شبکه مورد نظرنوشته شده می شود. حل همزمان این معادلات، مقادیرتابع را در هرگره تخمین می زند. روش تفاضل محدودبه دو صورت انجام می شود:۱-استفاده ازبسط تیلور. ۲- کاربرد مفهوم حجم کنترل.

درروش تفاضل های محدود به جای مشتق های جزئی از تفاضل های محدود استفاده می‌شود. به این صورت مشتقات جزئی با تفاضل های محدود تقریب زده می شود. در ابتدا جهت این تقریب از بسط تیلور استفاده می شود که در آن از جملات مرتبه دوم به بالا صرفنظر شده بود ولی بعدها این روش کاملتر گردید. ولی در صورت استفاده ازاین روش نخست بایستی محدوده مورد نظر را به صورت استفاده ازاین روش نخست بایستی محدوده مورد نظر را به صورت گره تبدیل کرد و سپس بر روی گره های مذکورجملات مربوط به مشتقات جزئی را بسط داد.در صورت استفاده از روش تفاضل های محدود برای بسط $\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right),\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)$ درمعادلات سنت ونانت می توان از ۳ روش زیر استفاده کرد:الف- روش صریح (Expicit method):در این روش برای بسط عبارات مذکور از مقادیر آنها درزمان حال استفاده می شود.

$$\frac{\partial H}{\partial x}=\frac{H_{i+1}^{h}-H_{i}^{h}}{\Delta x} \tag{۱}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x}=\frac{Q_{i+1}^{n}-Q_{i}^{n}}{\Delta x} \tag{۲}$$

ب- روش کرانک نیکلسون:

در این روش برای بسط عبارات ذکرشده از متوسط مقادیر فوق بین زمان حال و آینده استفاده می شود.

$$\frac{\partial H}{\partial x}=\frac{\left(H_{i+1}^{n}+H_{i+1}^{n+1}\right)-\left(H_{i}^{n}+H_{i}^{n+1}\right)}{2\Delta x} \tag{۳}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}=\frac{\left(Q_{i+1}^{n}+Q_{i+1}^{n+1}\right)-\left(Q_{i}^{n}+Q_{i}^{n+1}\right)}{2\Delta x} \tag{۴}$$

پ-روش غیرصریح (ضمنی):در این روش برای بسط عبارات مذکور از مقادیرآنها در زمان آینده استفاده می شود. بسط عبارتهای ذکر شده در این روش به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}=\frac{\left(Q_{i}^{n}-Q_{i}^{n+1}\right)}{\Delta x} \tag{۵}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}=\frac{\left(H_{i+1}^{n}+H_{i+1}^{n+1}\right)}{\Delta x} \tag{۶}$$

مقایسه سه روش:

روش های صریح و کرانک نیلکسون دارای دو اشکال عمده هستند. ۱-دراین روشها جواب معادلات از دقت پایین تری نسبت به روش غیرصریح برخوردار است. در صورتی که روش غیرصریح همراه پایدار بوده و جواب های آن از دقت بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردار هستند. ۲-به دلیل استفاده از مقادیر مذکور در زمان حال، پایداری معادلات مشروط خواهد بود. لذا به هنگام حل معادلات باید بین $\Delta x$ و $\Delta t$ علاوه بر معیار کورانت شرط دیگری نیز برقرار باشد که همین عامل سبب محدود شدن دامنه کاربرد معادلات می شود.نکته مهم اینکه حجم محاسبات روشهای تفاضل محدود نسبت به سایر روشهای کامل به ویژه روش اجزاء محدود کمتر است.

۴-۳-روش اجزاء محدود[۱]

این روش در دهه های اخیر ابداع شد و در حال گسترش می باشد. روش مذکور یک تکنیک برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است اساس روش اجزا محدود این است که محدوده مورد مطالعه را که محیطی پیوسته است به المانهایی بااشکال دلخواه از قبیل مثلث، مربع و یا هر شکل دیگر تقسیم می کنند. لذا جهت هر بازه دلخواه می توان آنرا به المانهایی ساده تقسیم کرد و سپس با اعمال معادلات بر روی المانهای مورد نظر و انتگرال گیری از آن بر روی کل بازه می توان جواب معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را محاسبه کرد. این روش در کارهای مربوط به حجم زیادی از حافظه دارد. در مقابل،روشهای تفاضل محدود در این زمینه نسبت به روش المانهای محدود دارای کاربرد بیشتری است. در سالهای اخیر بر روی این روش درزمینه مسائل مربوط به سیالات تحقیقات زیادی انجام شده و این رشته در حال تکامل و گسترش می باشد.

## ۴- روش انجام کار

همانگونه که بیان شد برای بدست آوردن مشخصات جریان های غیر دائمی از حل معادلات سنت ونانت استفاده می شود . شکل کلی این معادلات بصورت زیر است:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x}+gA\left(\frac{\partial y}{\partial x}-S_0\right)+gAS_f=0 \qquad (۸)$$

که در آن $Q$ دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه ، $A$ سطح مقطع جریان بر حسب متـر مربـع ، $S_0$ شـیب کـف کانـال ، $S_f$ شـیب اصـطکاکی ، $y$ تراز سطح آب درون کانال بر حسب متر و $x$ و $t$ به ترتیب مختصه مکان و زمان می باشند.بـرای محاسـبه شـیب اصـطکاکی $S_f$ از رابطـه مانینـگ استفاده می شود.

$$V=\frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}S_f^{\frac{1}{2}} \qquad (۹)$$

که در آن $V$ سرعت متوسط جریان بر حسب متر بر ثانیه ، $R$ شعاع هیدرولیکی بر حسب متر و $n$ ضریب مانینگ است.از معادله اخیر که به معادله مانینـگ معروف است ، امروزه در محاسبات جریان در کانال ها به دلیل سادگی و دقت بالای آن ، بطور گسترده استفاده می شود. گرچه صحت رابطه مانینگ فقط بـا استفاده از داده های آزمایشگاهی در وضعیت جریان یکنواخت ، به اثبات رسیده است ، ولی می توان از آن برای جریان های متغیر تدریجی مشروط بـر آنکـه به جای شیب کف کانال ، شیب خط انرژی را قرار داد ، استفاده نمود.

۴-۱- محدودیت کاربرد معادله مانینگ

مقدار ضریب مانینگ فقط در حالتی که کف و بدنه های کانال زبر و جریان آشفته است ، ثابت بوده و به عدد رینولدز وابسته نیست. نکته اخیر به ایـن مفهـوم است که چون در معادله مانینگ ، $n$ ثابت فرض می شود. لذا این معادله فقط برای مرزهای زبر در جریان متلاطم صادق بوده و کاربرد دارد. به عبارت دیگـر از معادله مانینگ نمی توان برای مرزهای صاف و بینابین درجریان متلاطم استفاده نمود. کسکین[۲] (۱۹۹۷) با انجام عملیات جبـری بـر روی معـادلات (۷) ،(۸) و(۹) معادله(۷) را بصورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\alpha\frac{\partial Q}{\partial x}+\beta=0 \qquad (۱۰)$$

که در آن $\alpha$ و $\beta$ با استفاده از روابط زیر بدست می آیند:

$$\alpha=2\frac{Q}{A}+\frac{\frac{gA}{B}-\frac{Q^2}{A^2}}{\frac{Q}{A}\left(\frac{5}{3}-\frac{4}{3}\frac{R}{B}\right)} \qquad (۱۱)$$

$$\beta=gA\left(S_f-S_0\right) \qquad (۱۲)$$

[1]-Finite Element Method
[2]-Keskin

برای حل معادله به شرایط اولیه و مرزی نیاز است که اکنون به بررسی آنها می پردازیم.

۴-۲- شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه به وضعیتی گفته می شود که طی آن مقدارمعادله در زمان $t = ۰$ داده می شود. در این معادله شرط اولیه عبارت است از:

$$Q(x,0) = Q_0 \quad (۱۳)$$

$$A(x,0) = A_0 \quad (۱۴)$$

که در آنها $Q_0$ و $A_0$ به ترتیب دبی وسطح مقطع جریان در حالت ماندگار است.با استفاده از شرایط مرزی مقدار معادله در مرزها داده می شود. در این معادله شرط مرزی عبارت است از:

$$Q(0,t) = Q_0(1 + a.Sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (۱۵)$$

$$Q(0,t) = h(t) \quad (۱۶)$$

که معادله (۱۵) برای $0 < t < t_b$ و معادله (۱۶) برای $t > t_b$ صدق می کند.

۴-۳- راه حل عددی

برای حل معادله دیفرانسیل (۱۰ ) از روش تفاضل محدود صریح استفاده می کنیم. لذا معادله مزبور بصورت زیر بازنویسی می شود:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^{j}}{\Delta t} + \alpha_m\left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i}^{j+1}}{\Delta x}\right) + \beta_m = 0 \quad (۱۷)$$

با استفاده از معادله(۱۷ ) مقدار $Q_{i+1}^{j+1}$ عبارت است از :

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{Q_{i+1}^{j} + \frac{\Delta t}{\Delta x}\alpha_m Q_i^{j+1} - \beta_m \Delta t}{1 + \alpha_m \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (۱۸)$$

که در آن $\alpha_m$ و $\beta_m$ با استفاده از روابط زیر بدست می آیند:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_i^{j+1} + \alpha_{i+1}^{j}}{2} \quad (۱۹)$$

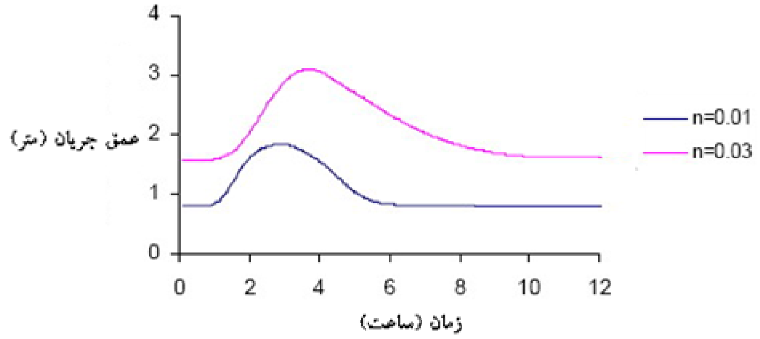
$$\beta_m = \frac{\beta_i^{j+1} + \beta_{i+1}^{j}}{2} \quad (۲۰)$$

در نهایت با محاسبه دبی برای هر گام زمانی بعد ، می توان $A(x,t)$ را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$A_{i+1}^{j+1} = A_{i+1}^{j} - \frac{Dx}{Dt}\left(Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}\right) + \frac{Dx}{2}\left(q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}\right) \quad (۲۱)$$

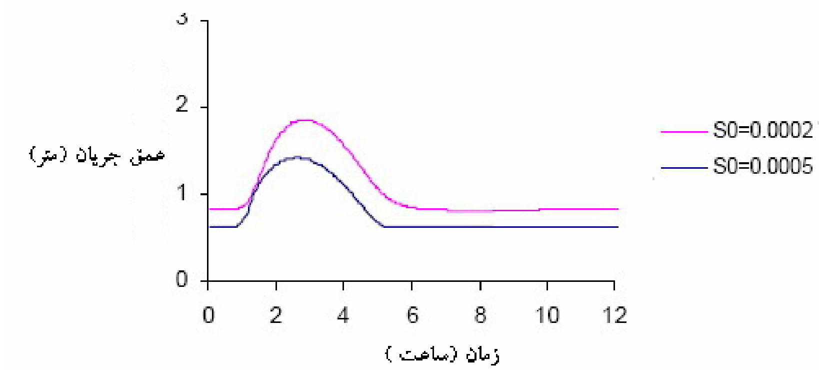
## ۴- مطالعه موردی

عملکرد مدل هیدرودینامیکی فوق جهت شبیه سازی و تحلیل تغییرات عمق آب ، هنگامی که موج جریان وارد کانال می شود بصورت تابعی از زمان مورد مطالعه قرار می گیرد. در این مثال طول و عرض کانال بترتیب ۵۰۰۰۰ و ۵۰متر و موج ورودی به کانال بصورت تابع سینوسی در نظر گرفته می شود. نمودار (۱) مقایسه میان عمق های مختلف جریان بر حسب متر هنگام ورود به کانال پس از ورود یک موج به ازای زمان های مختلف و شیب کف کانال $S_0 = ۰/۰۰۰۲$ نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود به ازای ضریب زبری $n = ۰/۰۱$ زمان حرکت موج ۳ساعت و عمق جریان حدود ۱/۸متر است. ولی به ازای $n = ۰/۰۳$ زمان حرکت موج ۴ساعت و بیشینه ارتفاع موج ۳متر خواهد بود.




**نمودار(۱)- تغییرات عمق جریان به ازای ضرایب زبری مختلف**

همانگونه که ملاحظه می شود متناسب با افزایش زبری ، عمق جریان آب نیز بیشتر می شود به دلیل اینکه ضریب زبری $n$ مهمترین عامل در محاسبه مقاومت در برابر جریان است. در نمودار (۲ ) تغییرات عمق جریان در زمان های مختلف به ازای شیب های کف ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۵ و ضریب زبری $n =$ ۰/۰۱ پس از عبور یک موج نشان می دهد. مشاهده می شود که هرقدر شیب کف کانال بیشتر باشد ، عمق جریان در کانال بیشتر خواهد بود . بنابراین هنگامی که شیب کف کانال $S_0 =$ ۰/۰۰۰۲ باشد ، پس از گذشت زمان ۲/۳ساعت ، عمق جریان برابر۱/۸متر و به ازای شیب کف ۰/۰۰۰۵و زمان ۲/۴ ساعت ، بیشینه ارتفاع موج آب درون کانال به ۱/۴متر می رسد.




**نمودار(۲)- تغییرات عمق جریان به ازای شیب های مختلف کف کانال**

## ۵- نتیجه گیری

مهمترین هدف تحقیق حاضر ، ارائه یک مدل هیدرودینامیکی برای ارزیابی تغییرات عمق آب در کانال ، پس از عبور یک موج بود. نتایج نشان می دهند که عمق جریان با شیب کف کانال رابطه مستقیم دارد. همچنین با افزایش ضریب زبری عمق جریان و زمان حرکت موج افزایش می یابد.

## منابع و مراجع

۱- محمودیان شوشتری ،محمد ،(۱۳۸۵) اصول جریان در مجاری باز ، جلد اول ، انتشارات دانشگاه شهید چمران ، اهواز
۲- حسینی ، محمود ; ابریشمی ،(۱۳۸۱) جلیل ، هیدرولیک کانال های باز ، انتشارات دانشگاه امام رضا ، چاپ نهم ، مشهد
۳- شرکت مهندسین مشاور درآب ،(۱۳۸۵) جزوه آشنایی با اصول و مبانی ریاضی مدلهای کامپیوتری در رسوب ، اهواز
۴- حامدی ، محمد حسین ،(۱۳۸۲) هیدرولیک مجاری باز ، جلد دوم ، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، چاپ اول ،
5-Keskin,M.E,; Agiralioglu , N.A.,(1997).Simplified Dynamic Model for Routing in Rectangular Channels,Journal of Hydrology ,v.202,p.302-314,Elsevier
6-Chow,V.T.,(1988).Applied Hydrology ,New York:McGraw Hill.572p
7-Chalfen , M.;Niemiec,A.(1996).Analytical and Numerical Solution of Saint-Venant Equations,Journal of Hydrology ,v.86,p.1-13