تحليل غيرخطي فشار هيدروديناميكي ناشي از زلزله بر بدنه سدهاي وزني صلب با استفاده از حل معادلات ناوير- استوكس با روش احجام محدود

حسين محمد ولي ساماني — استاد گروه عمران، دانشكده مهندسي، دانشگاه شهيد چمران اهواز
عباس رضائيان — مربي گروه عمران، دانشكده مهندسي، دانشگاه شهيد چمران اهواز

چكيده

در اين مقاله تحليل غيرخطي فشار هيدروديناميكي ناشي از زلزله بر بدنه سدها با استفاده از معادلات ناوير- استوكس ارائـه شده است. براي اولين بار از روش احجام محدود و الگوريتم SIMPLEC جهت منقطع‌كردن و حل معادلات ناوير- استوكس و پيوستگي استفاده شده است. شرايط مرزي ناشي از زلزله در بدنه سد و بستر مخزن اعمال گرديده است. سپس معادلات غيرخطي منقطع شده با استفاده از الگوريتم توماس (TDMA) همراه با تكرار حل گرديده است. با انتگرال‌گيري از فشارها بر بدنه سد نيروي هيدروديناميك تعيين مي‌شود. اين نيرو تابع زمان است و مي‌توان در هر لحظه زماني آن را تعيين نمود. برنامه‌اي كامپيوتري به زبان ويژوال بيسيك جهت اين تحليل تهيه گرديده است كه با استفاده از آن مي‌توان مؤلفه‌هاي سرعت و فشار هيدروديناميكي آب دركليه نقاط مختلف مخزن از جمله روي وجه بالادست بدنه سد و همچنين پروفيل سطح آب مخزن، به عنوان تابع زمان، تحت اثر زلزله دلخواه با درنظرگرفتن امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي را محاسبه نمود. نتايج به دست آمده با نتايج محققان ديگر مقايسه گرديده است و صحت، دقت و سرعت همگرايي مدل به اثبات رسيده است. جهت بررسي اثر امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي بر فشارهاي هيدروديناميك، مقايسه‌اي بين نتايج حاصل و روش تحليلي چوپرا انجام شده است.

كلمات كليدى: **نيروي هيدروديناميكي، الگوريتم توماس، روش احجام محدود ، شبكهبندي و شرايط مرزي.**

Nonlinear Analysis of Earthquake Hydrodynamic Pressure on Gravity Dam Body via The Solution of Navier Stokes Equations Using The Finite Volume Method

H. M.V. Samani and A. Rezaeian
Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Shahid Chamran University

Abstract

In this paper a nonlinear analysis of the earthquake hydrodynamic pressure on dam bodies using the Navier Stokes equations is used. The finite volume method SIMPLEC scheme for discretization of the Navier Stokes and continuity equations are utilized. Boundary conditions on the dam body and reservoir bed were applied. The nonlinear discretized equations were solved using Thomas algorithm by an iterative scheme. The hydrodynamic force exerted on the dam body was obtained by the integration of the calculated pressures. This Force is a function of time and hence it can be determined at any time interval. A computer program using the visual basic language was developed for the analysis to determine velocity components, pressures at nodal points of the reservoir grid including the face of the dam body, and reservoir water surface profile as a function of time due to an earthquake considering surface waves and nonlinear convective terms. Results were compared to those obtained by other researchers. The comparison indicates that the accuracy and convergence are quite satisfactory. The results were also compared with an analytical solution to investigate influences of surface waves and nonlinear convective terms.

Key words: Hydrodynamic force, Thomas algorithm, Finite volume method, Grid generation and boundary conditions.

۱- مقدمه

اهميت طراحي سازه سد از چشم كسي پنهان نيست، چراكه هر گونه اشتباه و لغزشي مي‌تواند ضايعات جبرانناپذيري بر پيكره جامعه وارد سازد. در طراحي، تحليل يكي از عمده‌ترين اجزاء مي‌باشد كه بايستي با دقت هر چه بيشتر انجام شود. اهميت تحليل در مناطق زلزله‌خيز بيشتر رخ مي‌نمايد، زيرا زلزله عاملي بسيار مهم در پديد آوردن تنش در سازه سد بوده، تأثير مهمي بر روند طراحي مي‌گذارد. بنابراين تحليل سازه سد در مناطق زلزله‌خيز و دقت هرچه بيشتر در محاسبات اهميت بيشتري مي‌يابد.

منظور نمودن اندركنش سد و مخزن در تحليل ديناميكي سد قدمي در جهت هرچه دقيقتر كردن محاسبات مي‌باشد. از سوي ديگر عوامل متفاوتي بر اندركنش فوق تأثير مي‌گذارند كه بررسي هر يك از عوامل فوق علاوه بر حل بهتر خود مسئله، از جنبه تحقيقاتي نيز حائز اهميت است و مي‌تواند منجر به بهبود روشهاي كلي تحليل گردد. مثالي از اين موضوع استفاده از روش احجام محدود در مدل‌كردن مخزن سد جهت بررسي و مطالعه ميدان جريان در مخزن و محاسبه فشارهاي هيدروديناميكي وارد بر سد در هنگام زلزله مي‌باشد. اين مقاله نيز در راستاي مطالعات مربوط به اندركنش سد و مخزن و با ملاحظه اهداف فوق نگاشته شده است.

در طول هفت دهه گذشته تكنيكهاي بسياري جهت محاسبه فشارهاي هيدروديناميك آب بر سد ارائه شده است. از جمله روشهاي تحليلي و تقريبي، روش المانهاي محدود، روش المانهاي مرزي، آناليز تابع T و روش تفاضلات محدود. در روشهاي تحليلي كارهاي وسترگارد و چوپرا از اهميت بيشتري برخوردار است. وسترگارد اولين كسي بود كه فشار هيدروديناميك آب بر روي سدهاي بتني وزني، تحت تأثير حركت هارمونيك افقي زمين را محاسبه كرد [۲۹]. وي سد را صلب، داراي طولي نامحدود و با بالادست قائم و كف مخزن را افقي، صلب و طول مخزن را بي‌نهايت فرض كرد، همچنين فرض تراكم‌پذيري خطي براي سيال و نيز شتاب هارمونيك افقي براي زمين را در كار خود منظور ساخت. بر اساس اين فرضيات او روشي تقريبي به نام روش جرم افزوده (Added mass) ارائه كرد كه طبق آن يك جرم اضافي فرضي كه به بدنه سد چسبيده است براي محاسبه نيروي هيدروديناميكي معادل نيروي زلزله در نظرگرفته مي‌شود.

كوتسابو نشان داد كه حل وسترگارد هنگامي معتبر است كه فركانس بارگذاري كمتر از فركانس طبيعي مخزن باشد [۱۸]. زانگر [۳۰] و زينكويچ [۳۱] توانستند با درنظرگرفتن فرضيات ساده‌كننده از جمله صرفنظر از تأثير تراكم‌پذيري آب، اين پديده را با ساير پديده‌هاي فيزيكي مانند توزيع ميدان الكتريكي در محيط عايق، توزيع ميدان پتانسيل جريان در محيط متخلخل و ... شبيه‌سازي نمايند و با استفاده از مدلهاي آزمايشگاهي، فشارهاي هيدروديناميك آب ناشي از زلزله را اندازه‌گيري نمايند. زانگر با استفاده از اين روش، فشار هيدروديناميك را براي سدهاي با وجه بالادست شيبدار محاسبه كرد و گرافهايي را پيشنهاد نمود. چوپرا [۷] با بررسي تأثير تراكم‌پذيري آب بر فشار هيدروديناميك مخزن نشان داد كه براي سيال تراكم‌ناپذير حل وسترگارد در كليه فركانسهاي بارگذاري صادق است ليكن در سدهاي بلند تأثير تراكم‌پذيري آب بر پاسخ نيروي هيدروديناميك، در فركانسهاي بالا قابل توجه است. روسن‌بلت [۲۳] عملكرد رسوبات كف مخزن در جذب امواج فشار هيدروديناميكي را در تحليل خود در نظر گرفت.

چوپرا و چاكرابارتي [۱۲] فشار هيدروديناميك و پاسخ سد وزني بتني را در اثر مؤلفه قائم زلزله محاسبه كردند، در اين روش پاسخ سد توسط تغيير شكلهاي مود اصلي ارتعاش تقريب زده مي‌شوند و نيز اثرات تغييرشكل‌پذيري پي نيز توسط وارد كردن ضريب شكست موج در رابطه‌سازي به طور تقريبي منظورگرديد. چوانگ [۱۳] و ليو [۲۰] اثرات قابل توجه مايل بودن وجه بالادست سد و شيبدار بودن كف مخزن بر فشارهاي هيدروديناميك وارد بر سد را مورد مطالعه قرار دادند.

با توجه به اينكه در روشهاي تحليلي سعي شده است كه با استفاده از تئوريهاي حل معادلات ديفرانسيل و به دست آوردن تابع جواب معادله حاكم، فشارهاي هيدروديناميك آب محاسبه شود، مشكل اساسي اين روش آن است كه با توجه به پيچيدگي معادلات و شرايط مرزي محيط سيال، به ناچار معادله حاكم با استفاده از فرضيات بسيار محدود كننده و براي حالتهاي خاص محاسبه گرديده است. لذا اين روش عليرغم دقت بالا، براي استفاده‌هاي كاربردي مناسب نمي‌باشد.

با پيشرفت روشهاي عددي به موازات پيشرفت كامپيوترها،

امکان بررسي و تحليل حالات مختلفي در اختيار محققان قرار گرفت. يکي از قويترين اين روشها، روش المانهاي محدود ميباشد که نهتنها قابليت مدلنمودن سازه سد را دارا ميباشد، بلکه ميتواند اثرات اندرکنش مخزن و پي را ملحوظ نمايد. چاکرابارتي و چوپرا [۲] براي اولين بار با استفاده از روش المانهاي محدود اندرکنش سد و مخزن را مورد بررسي قرار داد. آنها براي سازه سد از المانهاي چهارگرهي و در مخزن از المانهاي نيمه بينهايت استفاده نمود. پس از او ساينـي، بتس و زينکويچ [۳۲] سيستم سد و مخزن را با استفاده از اجزاء محدود تحليل کردند. چوپرا و هال [۱۰] روش تحليل براساس زيرسازهها را ارائهکردند که در آن سد و سيال به صورت دو زيرسازه عمل ميکنند. در اين مدل اندرکنش سيال و پي توسط يک شرط مرزي ميراکننده در امتداد کف مخزن و با استفاده از تئوري يکبعدي انتشار امواج منظور گرديده است. چوپرا و چاکرابارتي [۱۱] روشي عمومي براساس زيرسازهها براي تحليل پاسخ سدهاي بتني وزني تحت اثر مؤلفههاي افقي و عمودي زلزله ارائهکردند. در اين روش زيرسازه سد توسط اجزاء محدود، زيرسازه سيال در صورت سادگي هندسة آن به صورت محيط پيوسته و در صورت پيچيدگي نسبي آن توسط اجزاء محدود و بالاخره زير سازة پي به صورت نيمصفحة ويسکوالاستيک مدل شده است، اندرکنش پي و سد توسط اعمال معادلات تعادل و شرايط سازگاري در مرز مشترک سد و پي به معادلات حاکم بر دو زيرسازة سد و پي اضافه ميگردد و تغييرمکانهاي سازهاي سد توسط ترکيب خطي از بردارهاي ريتز (Ritz) بيان ميشود. خاصيت جذب امواج فشاري توسط رسوبات کف مخزن توسط چوپرا و فنوس [۸] به روش عددي، مورد بررسي و بازنگري قرار گرفت. زينکويچ و همکارانش [۳۳] المانهايي نامحدود با توابع شکل ويژهاي معرفي کردند که در مسائل امواج دورشونده نتايج مناسبتري به دست ميداد. چوپرا و فوک [۹] اندرکنش بين سد و سيال و پي را با درنظرگرفتن انعطافپذيري پي مورد مطالعه قرار دادند. لطفي، روست و تاسولاس [۲۱] سيستم سد - سيال - پي را با درنظرگرفتن تمامي اندرکنشها تحليل کردند. در اين روش اندرکنش سيال و جامد با اعمال پيوستگي تنش و مؤلفههاي جابجايي عمود بر فصل مشترك جامد و سيال منظور شده و پي به صورت لايهاي فرض شدهاست. تساي ولي [۲۵] از المانهاي مرزي براي مدلکردن شرط انتشار در منطقه دوردست دامنه سيال استفاده کردند. لي، تساي و يانگ [۱۹] يک مرز انتقالي صريح در حوزه زمان ارائه کردند که يك روش حل نيمه تحليلي معادله موج حاکم بر منطقه دور دست ميباشد. هومار و چاندراشاکر [۱۵] تحليلي به روش زيرسازهها ارائه کردند که در آن از تکنيکي مرکب از اجزاء محدود و اجزاء مرزي و حل محيط پيوسته استفاده شده است.

تئوري مطالعات قبلي به آناليز خطي محدود گرديده و از شتاب انتقالي غيرخطي و امواج سطح آزاد صرفنظر شده است و فرض گرديده که سطح آزاد آب، در هنگام زلزله افقي باقي ميماند، در حاليکه حرکت سد در اثر زلزله باعث ايجاد تغييرات در سطح آزاد مخزن ميشود. اولين بار چوانگ [۱۴] شتاب انتقالي غيرخطي و بالاآمدگي سطح آب را در تحقيق خود با فرض يك ديوارة صلب قائم و شتاب ثابت زمين، در نظر گرفت.

هونگ و ونگ [۱۷]، هونگ و چن [۱۶]، چن [۳ و ۴] و چن و يوان [۵] با استفاده از روش عددي تفاضلات محدود، در مورد تغييرات سطح آزاد آب در هنگام زلزله و فشارهاي هيدروديناميك غيرخطي مربوط به آن که بر وجه بالادست سدهاي وزني و قوسي وارد ميشود، مطالعات جامعي انجام دادند. ونگ و هونگ [۲۸] فشارهاي هيدروديناميك غيرخطي وارد بر وجه بالادست قائم سد با مخزن مستطيل شکل را، در حالت سهبعدي آناليز نمودند.

چن، يوان و لي [۶] آناليز سهبعدي غيرخطي فشارهاي هيدروديناميك وارد بر سد با وجه بالادست مايل و شکل هندسي دلخواه مخزن و با درنظرگرفتن امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي را انجام دادند و به منظور دقيق و شفاف نمودن اثرات هندسه سيستم سد - مخزن، از انعطافپذيري سد، تغييرشکل پي و اثرات رسوبات کف مخزن و تراکمپذيري آب صرفنظر نمودند. براي مسائل با مرزهاي متحرك، به خصوص سطح آزاد متحرك، روش تفاضلات محدود نتايج خوب و دقيقي ارائه نموده است.

۲- معادلات حاکم

فرضيات به کار برده شده عبارتند از :

۱- سد صلب و به طور نامحدودي طويل است.

۲-کف مخزن صلب و طول مخزن به اندازه کافي طويل است.

۳- سيال محيطي (آب)، همگن، ايزوتروپ، غيرلزج و تراکمناپذير است و تحت اثر جاذبه زمين قرار دارد.

با اعمال قانون بقاي جرم بر المان حجمي کوچك، معادله

پوستگي و با اعمال قانون بقاي اندازه حركت بر المان حجمي كوچك در جهات y,x معادلات اندازه حركت در دستگاه مختصات كارتزين، به فرم زير به دست مي‌آيند:

۳- پيوستگي

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (۱)$$

۳-۱- ناوير- استوكس در راستاي x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \qquad (۲)$$

۳-۲- ناوير – استوكس در راستاي y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} - g \qquad (۳)$$

كه v,u مؤلفه‌هاي سرعت سيال در جهات y,x هستند، P فشار كل (مجموع فشار هيدرواستاتيك و فشار هيدروديناميك)، ρ چگالي سيال و g شتاب ثقل مي‌باشد.

۴- شرايط مرزي

شرايط مرزي حاكم بر مرزهاي چهارگانه ناحيه حل شكل (۱) عبارتند از:

۴-۱- فصل مشترك سد و مخزن: فرض مي‌شود كه بين محيط سد و مخزن شرط سازگاري تغييرمكانها برقرار است و بين آنها جدايي اتفاق نمي‌افتد. همچنين شرط مرزي ديناميكي (۷) نيز برقرار است.

$$v = v_{eq}$$
$$u = u_{eq}$$
$$a_n = a_{n_{eq}}$$
$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho\, a_n \qquad (۴)$$

۴-۲- كف مخزن: بين محيط زمين و مخزن شرط سازگاري تغييرمكانها برقرار است و بين آنها جدايي اتفاق نمي‌افتد.

$$v = v_{eq}$$
$$u = u_{eq} \qquad (۵)$$

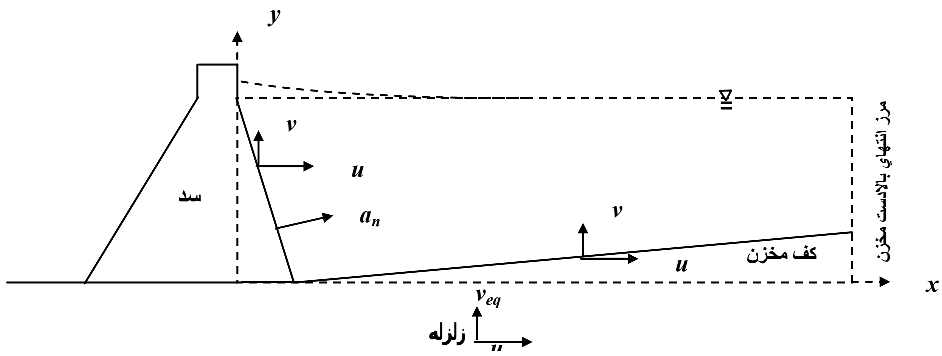
۴-۳- سطح آزاد مخزن: فشار كل صفر مي‌باشد همچنين در لايه نازك مجاور سطح آزاد از گراديان سرعت افقي در راستاي قائم به علت كوچكي صرفنظر مي‌شود.

$$P = 0$$
$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \qquad (۶)$$

۴-۴- انتهاي بالادست مخزن: گراديان سرعت افقي در جهت x بسيار كوچك است و با تقريب خوبي مي‌توان از آن صرفنظركرد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \qquad (۷)$$

كه n بردار نرمال عمود بر سطح مشترك سد و مخزن، u_{eq}, v_{eq} مؤلفه‌هاي قائم و افقي سرعت زمين و $a_{n_{eq}}, a_n$ شتاب سيال و زمين در راستاي n مي‌باشند.



شكل ۱- شرايط مرزي سيستم سد و مخزن

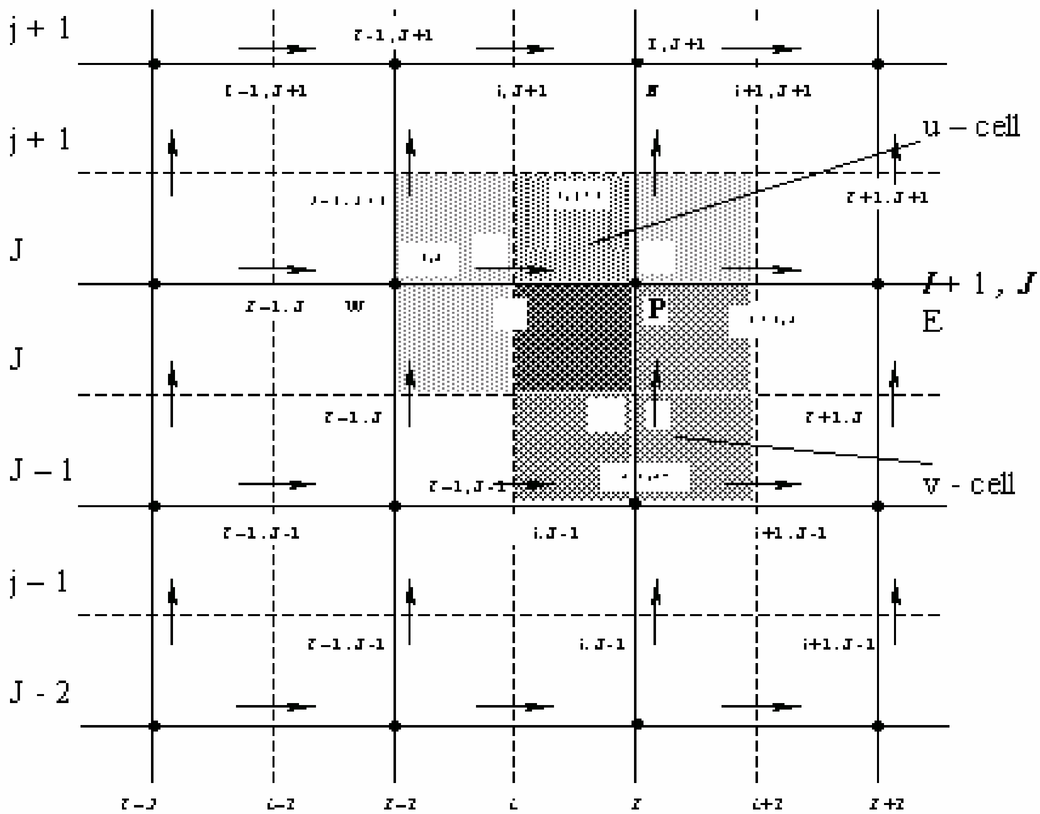
با حل معادلات حاکم با استفاده از روش عددي احجام محـدود و با در نظر گرفتن شرايط اوليه و مرزي، مي‌تـوان مجهـولات v,u,p در تمام نقاط مخزن، از جمله روي وجه بالادست سد را محاسـبه نمود.

۵- روش عددي احجام محدود

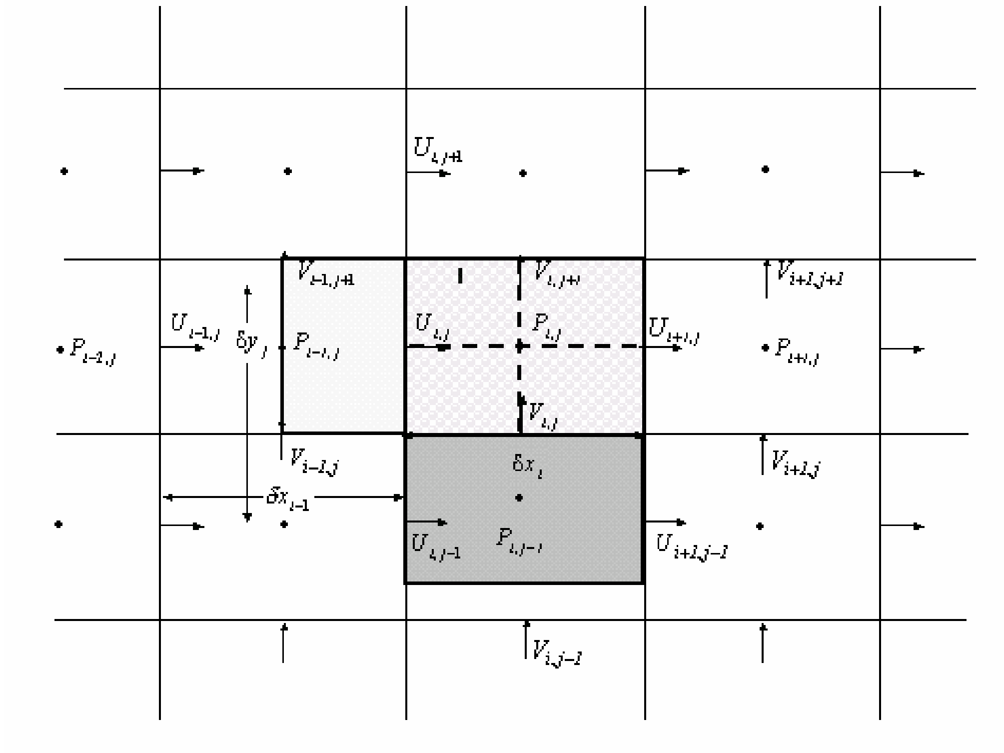
۵-۱- شبکه‌بندي

براي حل معـادلات بـه کمـك روش عـددي احجـام محـدود مي‌بايست اين معادلات بر روي محيط موردنظر منفـصل گردنـد. بنابراين لازم است محيط مخزن به صورتي مناسب شـبکه‌بنـدي شود. براي توليد شبکه احجـام محـدود، نحـوه قرارگيـري وجـوه حجم‌کنترل بايـد بـه گونــه‌اي باشد که معادله گسستة به دست آمـده، کلي و قابل اجرا باشـد. لـذا ابتدا مرزهاي حجم‌کنتـرلها را ترسيم کرده، سپس در مرکز هندسي هر حجم‌کنتـرل يـك گـره قرار مي‌دهيم. با توجه به شکل (۲) متغيرهاي اسکالر شامل فشار، در گـره‌هـايي کـه بـا علامـت ● نـشان داده شـده اسـت ذخيـره مي‌شوند. سرعتها در وجوه سلول بين گـره‌هـا تعريـف شـده و بـا پيکان نمايش داده شده‌انـد. پيکانهـاي افقـي (→) نـشان دهنـده سرعتها در جهت u و پيکانهـاي عمـودي (↑) مبـين سـرعتها در جهت v مي‌باشند.

ملاحظه مي‌کنيم که حجم‌کنترلهاي مربوط به u و v نسبت به حجم کنترلهاي فشار و نيز يکديگر متفاوت مي‌باشند. از حجم کنترل فشار براي گسسته‌سازي معادله پيوستگي، از حجم کنترل u براي گسسته‌سازي معادله اندازه حرکت u و از حجم کنترل v بـراي گسسته‌سازي معادله اندازه حرکت v استفاده مي‌شود شکل (۳).



شکل ۲- حجم کنترلها ي v,u,p



شکل ۳- حجم‌کنترلهاي فشار P و سرعتهاي u و v و سیستم شماره‌گذاري آنها

بدين ترتيب براي هريك از مجهولات v,u,p در هـريك از نقاط داخلي ناحيه محاسباتي يك معادله گسسته به دست مي‌آيد و براي مجهولات واقع بر مرزها از شرايط مرزي استفاده مي‌گردد. بنابراين تعداد معادلات و مجهولات در دستگاه معادلات حاكم بر مسئله مساوي خواهد شد.

۵-۲- گسسته‌سازي معادلات ديفرانسيل حاكم

انتگـرال‌گيـري از معادلــه ديفرانــسيل حــاكم روي يــك حجم‌كنتــرل، قدم اصلي در روش حجم محـدود بـراي رسـيدن بـه يك معادلــه گسسته كه شامل مقادير متغير وابسته (فـشار و مؤلفه‌هاي سرعت) براي گروهي از گره‌ها است، مي‌باشـد. معادلـه گســسته بـه دسـت آمـده اصـل بقـاء كميـت مربوطـه را بـراي حجم‌كنترلي محدود بيان مي‌دارد، درست همانگونـه كـه معادلـه ديفرانسيل، آن را براي يك حجم‌كنترل بـي‌انـدازه كوچـك بيـان مي‌كند [ورستيگ و مالالاسكرا (۱۹۹۵)] .

۵-۲-۱- گسسته‌سازي معادلـه اندازه حركت u

با انتگرال‌گيري از معادله ديفرانسيل اندازه حركـت u بـر روي حجم‌كنترل سرعت u و گـام زمـاني محـدود δt ، فـرم گسـستة مرتب شده در قالب سه‌قطري معادله اندازه حركت u بـه صـورت ذيل به دست مي‌آيد:

$$\int_{\delta t}\iint_{cv}\frac{\partial u}{\partial t}\,dt\,dx\,dy+\int_{\delta t}\iint_{cv}u\frac{\partial u}{\partial x}\,dx\,dy\,dt+$$
$$\int_{\delta t}\iint_{cv}v\frac{\partial u}{\partial y}\,dx\,dy\,dt+\frac{1}{\rho}\int_{\delta t}\iint_{cv}\frac{\partial P}{\partial x}\,dx\,dy\,dt=0 \qquad (۸)$$

$$A_{u_{i,j}}U_{i-1,j}^{n+1}+B_{u_{i,j}}U_{i,j}^{n+1}+C_{u_{i,j}}U_{i+1,j}^{n+1}=D_{u_{i,j}} \qquad (۹)$$

كه:

$$A_{u_{i,j}}=-\frac{(U_{i-1,j}^{n+1}+2U_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}$$
$$B_{u_{i,j}}=1$$
$$C_{u_{i,j}}=\frac{(U_{i+1,j}^{n+1}+2U_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}$$
$$D_{u_{i,j}}=\frac{\delta t}{8\delta y_j}(V_{i,j}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j}^{n+1})(U_{i,j-1}^{n+1}-U_{i,j+1}^{n+1})$$
$$-\frac{\delta t}{8\delta y_j}(V_{i,j}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j}^{n+1} \qquad (۱۰)$$

۵-۲-۲- گسسته‌سازي معادلـه اندازه حرکت v

با انتگرال‌گيري از معادلــه ديفرانسيل اندازه حرکت v بر روي حجم‌کنترل سرعت v و گـام زمـاني محـدود δt ، فـرم گسـستة مرتب شده در قالب سه‌قطري معادله اندازه حرکت v بـه صـورت ذيل به دست مي‌آيد:

$$\int_{\delta t}\iint_{cv}\frac{\partial v}{\partial t}dt\,dx\,dy+\int_{\delta t}\iint_{cv}u\frac{\partial v}{\partial x}dx\,dy\,dt+\int_{\delta t}\iint_{cv}v\frac{\partial v}{\partial y}dx\,dy\,dt+$$
$$\int_{\delta t}\iint_{cv}\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}dx\,dy\,dt+\int_{\delta t}\iint_{cv}g\,dx\,dy\,dt=0 \qquad (۱۱)$$

$$A_{V_{i,j}}V_{i-1,j}^{n+1}+B_{V_{i,j}}V_{i,j}^{n+1}+C_{V_{i,j}}V_{i+1,j}^{n+1}=D_{V_{i,j}} \qquad (۱۲)$$

که:

$$A_{V_{i,j}}=-\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U_{i+1,j}^{n+1}+U_{i,j}^{n+1}+U_{i,j-1}^{n+1}+U_{i+1,j-1}^{n+1})$$
$$B_{V_{i,j}}=1$$
$$C_{V_{i,j}}=\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U_{i+1,j}^{n+1}+U_{i,j}^{n+1}+U_{i,j-1}^{n+1}+U_{i+1,j-1}^{n+1})$$
$$D_{V_{i,j}}=\left[\frac{\delta t(V_{i,j-1}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})}{4(\delta y_i+\delta y_{j-1})}\right]V_{i,j-1}^{n+1}-$$
$$\left[\frac{\delta t(V_{i,j+1}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})}{4(\delta y_j+\delta y_{j-1})}\right]V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i,j}^{n}-$$
$$g\delta t-\frac{2\delta t}{\rho(\delta y_j+\delta y_{j-1})}(P_{i,j}^{n+1}-P_{i,j-1}^{n+1}) \qquad (۱۳)$$

۵-۳- گسسته‌سازي معادله پيوستگي

بـا انتگـرال‌گيـري از معادلـه ديفرانـسيل پيوسـتگي بـر روي حجم‌کنترل اسکالر فشار، فرم گسسته معادله پيوستگي به دسـت مي‌آيد:

$$\iint_{CV}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)dxdy=\iint_{CV}\frac{\partial u}{\partial x}dxdy+\iint_{CV}\frac{\partial v}{\partial y}dxdy=$$
$$\iint_{CV}du\,dy+\iint_{CV}dv\,dx=\int[u]_w^e\,dy+\int[V]_s^n\,dx=0 \qquad (۱۴)$$

$$(U_{i+1,j}^{n+1}-U_{i,j}^{n+1})\delta y_j+(V_{i,j+1}^{n+1}-V_{i,j}^{n+1})\delta x_i=0 \qquad (۱۵)$$

با جايگزيني سرعتها با استفاده از معادلات گسسته اندازه حرکت u , v ، معادله جبري فشار P به صورت زير به دست مي‌آيد:

$$A_{P_{i,j}}P_{i-1,j}^{n+1}+B_{P_{i,j}}P_{i,j}^{n+1}+C_{P_{i,j}}P_{i+1,j}^{n+1}=D_{P_{i,j}} \qquad (۱۶)$$

که :

$$A_{P_{i,j}}=-\frac{2\delta t\delta y_j}{\rho(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}$$
$$B_{P_{i,j}}=\frac{2\delta t}{\rho}\left(\frac{\delta y_j}{\delta x_i+\delta x_{i+1}}+\frac{\delta y_j}{\delta x_{i-1}+\delta x_i}+\frac{\delta x_i}{\delta y_{j+1}+\delta y_j}+\frac{\delta x_i}{\delta y_j+\delta y_{j-1}}\right)$$
$$C_{P_{i,j}}=-\frac{2\delta t\delta y_j}{\rho(\delta x_i+\delta x_{i+1})}$$
$$D_{P_{i,j}}=\left[\frac{2\delta t\delta x_i}{\rho(\delta y_j+\delta y_{j-1})}\right]P_{i,j-1}^{n+1}+$$
$$\left[\frac{2\delta t\delta x_i}{\rho(\delta y_{j+1}+\delta y_j)}\right]P_{i,j+1}^{n+1}+(\hat{U}_{i,j}^{n+1}-\hat{U}_{i+1,j}^{n+1})\delta y_j$$
$$+(\hat{V}_{i,j}^{n+1}-\hat{V}_{i+1,j}^{n+1})\delta x_i \qquad (۱۷)$$

$$\hat{U}_{i,j}^{n+1}=\left[\frac{-(U_{i+1,j}^{n+1}+2U_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}\right]U_{i+1,j}^{n+1}+$$
$$\left[\frac{(U_{i-1,j}^{n+1}+2U_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}\right]U_{i-1,j}^{n+1}$$
$$-\left[\frac{\delta t}{8\delta y_j}(V_{i,j}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j}^{n+1})\right]U_{i,j+1}^{n+1}+$$
$$\left[\frac{\delta t}{8\delta y_j}(V_{i,j}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j}^{n+1})\right]U_{i,j-1}^{n+1}+U_{i,j}^{n} \qquad (۱۸)$$

$$\hat{U}_{i+1,j}^{n+1}=\left[-\frac{U_{i+2,j}^{n+1}+2U_{i+1,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_i+\delta x_{i+1})}\right]U_{i+2,j}^{n+1}$$
$$+\left[\frac{(U_{i,j}^{n+1}+2U_{i+1,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_i+\delta x_{i+1})}\right]U_{i+2,j}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n}$$
$$-\left[\frac{\delta t}{8\delta y_j}\left(V_{i+1,j}^{n+1}+V_{i+1,j+1}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i,j}^{n+1}\right)\right]U_{i+1,j+1}^{n+1}$$
$$+\left[\frac{\delta t}{8\delta y_j}\left(V_{i+1,j}^{n+1}+V_{i+1,j+1}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i,j}^{n+1}\right)\right]U_{i+1,j-1}^{n+1} \qquad (۱۹)$$

$$\hat{V}_{i,j}^{n+1}=\left[\frac{(V_{i,j}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta y_j+\delta y_{j-1})}\right]V_{i,j-1}^{n+1}-$$
$$\left[\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U_{i+1,j}^{n+1}+U_{i,j}^{n+1}+U_{i,j-1}^{n+1}+U_{i+1,j-1}^{n+1})(\delta y_j+\delta y_{j-1})\delta t\right]V_{i-1,j}^{n+1}$$
$$-\left[\frac{(V_{i,j+1}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta y_j+\delta y_{j-1})}\right]V_{i,j+1}^{n+1}-$$

$$\left[\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U^{n+1}_{i+1,j}+U^{n+1}_{i,j}+U^{n+1}_{i,j-1}+U^{n+1}_{i+1,j-1})(\delta y_j+\delta y_{j-1})\delta t\right]V^{n+1}_{i+1,j}+V^{n}_{i,j}-g\,\delta t \quad (۲۰)$$

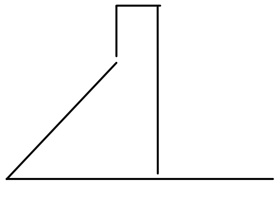
$$\hat{V}^{n+1}_{i,j+1}=\left[\frac{\delta t(V^{n+1}_{i,j}+2V^{n+1}_{i,j+1})}{4(\delta y_{j+1}+\delta y_j)}\right]V^{n+1}_{i,j}-\left[\frac{\delta t(V^{n+1}_{i,j+2}+2V^{n+1}_{i,j+1})}{4(\delta y_{j+1}+\delta y_j)}\right]V^{n+1}_{i,j+2}$$
$$+V^{n}_{i,j+1}-g\,\delta t+\left[\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U^{n+1}_{i+1,j+1}+U^{n+1}_{i,j+1}+U^{n+1}_{i,j}+U^{n+1}_{i+1,j})\right]V^{n+1}_{i-1,j+1}$$
$$-\left[\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U^{n+1}_{i+1,j+1}+U^{n+1}_{i,j+1}+U^{n+1}_{i,j}+U^{n+1}_{i+1,j})\right]V^{n+1}_{i+1,j+1} \quad (۲۱)$$

۶- تيپ‌بندي حجم‌كنترلها

با توجه به وجود مرزهاي متفاوت براي كل حوزه محاسباتي (مخزن سد) كه عبارتند از: سطح آزاد مخزن، بدنه سد، كف مخزن و بالادست دور، حجم‌كنترلها بسته به موقعيت قرارگيري و به تبع شرايط حاكم بر مرزهاي (وجوه) چهارگانه آنها به نه تيپ متفاوت تقسيم‌بندي مي‌شوند و هر تيپ فرمولاسيون خاص خود را دارا مي‌باشد كه با اعمال شرايط مرزي مربوطه از طريق انجام اصلاحاتي در استخراج معادلات گسسته به دست مي‌آيد.

در شكل (۴) شرايط مرزي حاكم بر هريك از وجوه چهارگانه تيپهاي نه‌گانه حجم‌كنترلها و موقعيت قرارگيري آنها نشان داده شده است. معادلات جبري بدست آمده قبلي، براي حجم‌كنترلهاي داخلي (تيپ ۵) مي‌باشند و معادلات جبري حاكم بر هريك از تيپهاي حجم‌كنترلهاي مرزي با انتگرال‌گيري از معادلات حاكم با اعمال شرايط مرزي مربوطه به فرم كلي روابط ۹، ۱۲ و ۱۶ مي‌باشند و روابط لازم جهت محاسبه ضرائب آنها براي هريك از تيپها در ادامه آمده است.

وجوه حجم‌كنترل / type	شمالي	جنوبي	غربي	شرقي
۱	مخزن	كف مخزن	بدنه سد	مخزن
۲	مخزن	كف مخزن	مخزن	مخزن
۳	مخزن	كف مخزن	مخزن	بالادست دور
۴	مخزن	مخزن	بدنه سد	مخزن
۵	مخزن	مخزن	مخزن	مخزن
۶	مخزن	مخزن	مخزن	بالادست دور
۷	سطح آزاد	مخزن	بدنه سد	مخزن
۸	سطح آزاد	مخزن	مخزن	مخزن
۹	سطح آزاد	مخزن	مخزن	بالادست دور



سطح آزاد

۷	۸	۸	۸	۹
۴	۵	۵	۵	۶
۴	۵	۵	۵	۶
۱	۲	۲	۲	۳

شكل ۴- موقعيت قرارگيری تيپهای حجم كنترلها

۷- ضرايب معـادلات جبــري حــاكم بــر احجـام محدود مرزي تيپ ۱

باتوجه به شرايط مرزي، در احجام محدود مرزي تيپ ۱ سرعتهاي v , u در وجوه غربي و جنوبي برابر سرعتهاي زلزله مي‌باشنـد لـذا ضرائــب معــادلات جبـــري حاكم تغييرنموده و به صورت ذيل به دست مي‌آيند:

$$A_{u_{i,j}} = 0\ ,\ B_{u_{i,j}} = 1\ ,\ C_{u_{i,j}} = 0,\ D_{u_{i,j}} = U_{eq}^{n+1} \quad (۲۲)$$

$$A_{V_{i,j}} = 0\ ,\ B_{V_{i,j}} = 1\ ,\ C_{V_{i,j}} = 0\ ,\ D_{V_{i,j}} = V_{eq}^{n+1`} \quad (۲۳)$$

$$A_{P_{i,j}} = 0\ ,\ B_{P_{i,j}} = \frac{\delta t}{\rho}\left(\frac{\delta x_i^2}{\beta_1} + \frac{\delta y_j^2}{\lambda_1}\right)$$

$$,\ C_{P_{i,j}} = -\frac{\delta t}{\rho}\left(\frac{\delta y_j^2}{\lambda_1}\right)$$

$$D_{P_{i,j}} = \frac{\delta x_i^2 \delta t}{\rho\beta_1} P_{i,j+1}^{n+1} - (\hat{U}_{i+1,j}^{n+1} + U_{eq}^{n+1})\delta y_j - (\hat{V}_{i,j+1}^{n+1} + V_{eq}^{n+1})\delta x_i \quad (۲۴)$$

$$\begin{aligned}\hat{U}_{i+1,j}^{n+1} = &-\frac{1}{8\lambda_1}\left[(U_{i+2,j}^{n+1} + 2U_{i+1,j}^{n+1})\delta y_j \delta t\right]U_{i+2,j}^{n+1} - \\ &\frac{1}{16\lambda_1}\left[(V_{i+1,j+1}^{n+1} + V_{i,j+1}^{n+1} + V_{eq}^{n+1})(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta t\right]U_{i+1,j+1}^{n+1} + \\ &\frac{1}{8\lambda_1}\left[(U_{eq}^{n+1} + 2U_{i+1,j}^{n+1})\delta y_j \delta t + (V_{i+1,j+1}^{n+1} + V_{i,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta t\right]U_{eq}^{n+1} \\ &+ \frac{1}{2\lambda_1}\left[(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta y_j\right]U_{i+1,j}^{n}\end{aligned} \quad (۲۵)$$

$$\begin{aligned}\hat{V}_{i,j+1}^{n+1} = &\left[-\frac{1}{16\beta_1}(U_{i+1,j+1}^{n+1} + U_{i+1,j}^{n+1} + 2U_{eq}^{n+1})(\delta y_j + \delta y_{j+1})\delta t\right]V_{i+1,j+1}^{n+1} \\ &-\left[\frac{1}{2\beta_1} g\,\delta x_i(\delta y_{j+1} + \delta y_j)\delta t\right] \\ &+\left[\frac{1}{8\beta_1}(U_{i+1,j+1}^{n+1} + U_{i+1,j}^{n+1} + 2U_{eq}^{n+1})(\delta y_j + \delta y_{j+1})\delta t + \frac{1}{8\beta_1}(V_{eq}^{n+1} + 2V_{i,j+1}^{n+1})\delta x_i \delta t\right]V_{eq}^{n+1} \\ &-\left[\frac{1}{8\beta_1}(V_{i,j+2}^{n+1} + 2V_{i,j+1}^{n+1})\delta x_i \delta t\right]V_{i,j+2}^{n+1} \\ &+\left[\frac{1}{2\beta_1}(\delta y_j + \delta y_{j+1})\delta x_i\right]V_{i,j+1}^{n}\end{aligned} \quad (۲۶)$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{1}{2}(\delta y_{j+1} + \delta y_j)\delta x_i + \frac{1}{16}(U_{i+1,j+1}^{n+1} + U_{i+1,j}^{n+1} + 2U_{eq}^{n+1})(\delta y_{j+1} + \delta y_j)\delta t \\ \lambda_1 &= \frac{1}{2}(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta y_j + \frac{1}{16}(V_{i+1,j+1}^{n+1} + V_{i,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta t\end{aligned} \quad (۲۷)$$

۸- ضرايـب معادلات جبـري حاكـم بـر احجام محـدود مرزي تيپ ۲

در احجام محدود مرزي تيپ ۲ سرعتهاي u , v در وجه جنوبي برابر سرعتهاي زلزله مي‌باشند، لذا ضرائب معادلات جبري حاكم به صورت ذيل به دست مي‌آيند :

$$\begin{aligned}A_{u_{i,j}} &= -\frac{1}{8}(U_{i-1,j}^{n+1} + 2U_{i,j}^{n+1})\delta y_j \delta t \\ B_{u_{i,j}} &= \frac{1}{2}(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta y_j + \frac{1}{16}(V_{i,j+1}^{n+1} + V_{i-1,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_{i-1} + \delta x_i) \\ C_{u_{i,j}} &= \frac{1}{8}(U_{i+1,j}^{n+1} + 2U_{i,j}^{n+1})\delta y_j \delta t \\ D_{u_{i,j}} &= \left[-\frac{1}{16}(V_{i-1,j}^{n+1} + V_{i-1,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t\right]U_{i,j+1}^{n+1} \\ &+\left[\frac{1}{8}(V_{i,j+1}^{n+1} + V_{i-1,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t\right]U_{eq}^{n+1} \\ &+\left[\frac{1}{2}(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta y_j\right]U_{i,j}^{n} - \frac{1}{\rho}\delta y_j \delta t(P_{i,j}^{n+1} - P_{i-1,j}^{n+1})\end{aligned} \quad (۲۸)$$

$$A_{v_{i,j}} = 0\ ,\ B_{V_{i,j}} = 1\ ,\ C_{V_{i,j}} = 0\ ,\ D_{V_{i,j}} = V_{eq}^{n+1} \quad (۲۹)$$

$$\begin{aligned}A_{P_{i,j}} &= -\frac{\delta y_j^2 \delta t}{\rho\lambda_2} \\ B_{P_{i,j}} &= \frac{\delta y_j^2 \delta t}{\rho\lambda_2'} + \frac{\delta y_j^2 \delta t}{\rho\lambda_2} + \frac{2\delta x_i \delta t}{\rho(\delta y_{j+1} + \delta y_j)} \\ C_{P_{i,j}} &= -\frac{\delta y_j^2 \delta t}{\rho\lambda_2'} \\ D_{P_{i,j}} &= \left(\frac{2\delta x_i \delta t}{\rho(\delta y_{j+1} + \delta y_j)}\right) \\ &P_{i,j+1}^{n+1} + (\hat{U}_{i,j}^{n+1} - \hat{U}_{i+1,j}^{n+1})\delta y_j + (V_{eq}^{n+1} - \hat{V}_{i,j+1}^{n+1})\delta x_i\end{aligned} \quad (۳۰)$$

$$\begin{aligned}\hat{U}_{i,j}^{n+1} = &\left[\frac{1}{8\lambda_2}(U_{i-1,j}^{n+1} + 2U_{i,j}^{n+1})\delta y_j \delta t\right]U_{i-1,j}^{n+1} - \\ &\left[\frac{1}{8\lambda_2}(U_{i+1,j}^{n+1} + 2U_{i,j}^{n+1})\delta y_j \delta t\right]U_{i+1,j}^{n+1} \\ &-\left[\frac{1}{16\lambda_2}(V_{i,j+1}^{n+1} + V_{i-1,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t\right]U_{i,j+1}^{n+1} \\ &+\left[\frac{1}{8\lambda_2}(V_{i,j+1}^{n+1} + V_{i-1,j+1}^{n+1} + 2V_{eq}^{n+1})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t\right]U_{eq}^{n+1} \\ &+\left[\frac{1}{2\lambda_2}(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta y_j\right]U_{i,j}^{n}\end{aligned} \quad (۳۱)$$

$$\hat{U}^{n+1}_{i+1,j} = \left[\frac{1}{8\lambda'_2}(U^{n+1}_{i,j} + 2U^{n+1}_{i+1,j})\delta y_j \delta t\right]U^{n+1}_{i,j}$$
$$-\left[\frac{1}{8\lambda'_2}(U^{n+1}_{i+2,j} + 2U^{n+1}_{i+1,j})\delta y_j \delta t\right]U^{n+1}_{i+2,j}$$
$$-\left[\frac{1}{16\lambda'_2}(V^{n+1}_{i+1,j+1} + V^{n+1}_{i,j+1} + 2V^{n+1}_{eq})(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta t\right]U^{n+1}_{i+1,j+1}$$
$$+\left[\frac{1}{8\lambda'_2}(V^{n+1}_{i+1,j+1} + V^{n+1}_{i,j+1} + 2V^{n+1}_{eq})(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta t\right]U^{n+1}_{eq}$$
(۳۲)

$$\hat{V}^{n+1}_{i,j+1} = \left[\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U^{n+1}_{i+1,j+1} + U^{n+1}_{i,j+1} + U^{n+1}_{i,j} + U^{n+1}_{i+1,j})\right]V^{n+1}_{i-1,j+1}$$
$$-\left[\frac{\delta t}{8\delta x_i}(U^{n+1}_{i+1,j+1} + U^{n+1}_{i,j+1} + U^{n+1}_{i,j} + U^{n+1}_{i,j+1})\right]V^{n+1}_{i+1,j+1}$$
$$-\left[\frac{(V^{n+1}_{i,j+2} + 2V^{n+1}_{i,j+1})\delta t}{4(\delta y_{j+1} + \delta y_j)}\right]V^{n+1}_{i,j+2} +$$
$$\left[\frac{(V^{n+1}_{eq} + 2V^{n+1}_{i,j+1})\delta t}{4(\delta y_{j+1} + \delta y_j)}\right]V^{n+1}_{eq} + V^{n}_{i,j+1} - g\delta t$$
(۳۳)

$$\lambda_2 = \frac{1}{2}(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta y_j + \frac{1}{16}(V^{n+1}_{i,j+1} + V^{n+1}_{i-1,j+1} - 2V^{n+1}_{eq})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t$$
$$\lambda'_2 = \frac{1}{2}(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta y_j + \frac{1}{16}(V^{n+1}_{i+1,j+1} + V^{n+1}_{i,j+1} - 2V^{n+1}_{eq})(\delta x_i + \delta x_{i+1})\delta t$$
(۳۴)

۹- ضرایـب معادلات جبـري حـاکم بـر احجام محدود مرزي تیپ ۳

در احجام محدود مرزي تیپ ۳ سرعتهاي u , v در وجه جنوبي برابر سرعتهاي زلزله ميباشند، همچنین تغییرات سرعت u و فشار v در راستاي افق صفر است بنابراین سرعت u در وجوه غربي و شرقي یکسان است.

$$A_{u_{i,j}} = -\frac{1}{8\lambda_3}(U^{n+1}_{i-1,j} + 2U^{n+1}_{i,j})\delta y_j \delta t$$
$$, B_{u_{i,j}} = 1 + \frac{3}{8\lambda_3}\delta y_j \delta t U^{n+1}_{i,j} \ , C_{u_{i,j}} = 0$$
$$D_{u_{i,j}} = \left[-\frac{1}{16\lambda_3}(V^{n+1}_{i-1,j+1} + 3V^{n+1}_{eq})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t\right]U^{n+1}_{i,j+1}$$
$$+\left[\frac{1}{2\lambda_3}(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta y_j\right]U^{n}_{i,j}$$
$$+\left[\frac{1}{8\lambda_3}(V^{n+1}_{i-1,j+1} + 3V^{n+1}_{eq})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t\right]U^{n+1}_{eq}$$
$$-\left[\frac{\delta y_j \delta t}{\rho\lambda_3}(P^{n+1}_{i,j} - P^{n+1}_{i-1,j})\right] \quad (۳۵)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2}(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta y_j t$$
$$+\frac{1}{16}(V^{n+1}_{i-1,j+1} + 3V^{n+1}_{eq})(\delta x_{i-1} + \delta x_i)\delta t \quad (۳۶)$$

$$A_{V_{i,j}} = 0 \ , B_{V_{i,j}} = 1 \ , C_{V_{i,j}} = 0 \ , A_{V_{i,j}} = 0 \quad (۳۷)$$

$$A_{P_{i,j}} = -1 \ , B_{P_{i,j}} = 1 \ , C_{P_{i,j}} = 0 \ , D_{P_{i,j}} = 0 \quad (۳۸)$$

۱۰- ضرایـب معادلات جبري حاکم بر احجام محدود مرزي تیپ ۴

در احـجام محـدود مـرزي تیـپ ۴ سرعتهاي u , v در وجه غربي برابر سرعتهاي زلزله ميباشند، لذا ضرایب معادلات جبـري حاکم به صورت ذیل به دست ميآیند:

$$A_{u_{i,j}} = 0 \ , B_{u_{i,j}} = 1 \ , C_{u_{i,j}} = 0 \ , A_{u_{i,j}} = 0 \quad (۳۹)$$

$$A_{V_{i,j}} = 0$$
$$B_{V_{i,j}} = \frac{1}{2}(\delta y_j + \delta y_{j-1})\delta x_i +$$
$$\frac{\delta t}{16}(\delta y_j + \delta y_{j-1})(U^{n+1}_{i+1,j} + U^{n+1}_{i+1,j-1} + 2U^{n+1}_{eq})$$
$$C_{V_{i,j}} = \frac{\delta t}{16}(\delta y_j + \delta y_{j-1})(U^{n+1}_{i+1,j} + U^{n+1}_{i+1,j-1} + 2U^{n+1}_{eq})$$
$$D_{V_{i,j}} = \left[\frac{\delta t \delta x_i}{8}(V^{n+1}_{i,j-1} + 2V^{n+1}_{i,j})\right]V^{n+1}_{i,j-1} +$$
$$\left[\frac{\delta t}{8}(\delta y_j + \delta y_{j-1})(U^{n+1}_{i+1,j} + U^{n+1}_{i+1,j-1} + 2U^{n+1}_{eq})\right]V^{n+1}_{eq}$$
$$-\left[\frac{\delta t \delta x_i}{8}(V^{n+1}_{i,j+1} + 2V^{n+1}_{i,j})\right]V^{n+1}_{i,j+1} + \left[\frac{\delta x_i}{2}(\delta y_j + \delta y_{j-1})\right]V^{n}_{i,j}$$
$$-\frac{1}{2}g\delta x_j(\delta y_j + \delta y_{j-1})\delta t - \frac{\delta t \delta x_i}{\rho}(P^{n+1}_{i,j} - P^{n+1}_{i,j-1})$$
(۴۰)

$$A_{P_{i,j}} = 0 \ , B_{P_{i,j}} = \frac{\delta t}{\rho}\left(\frac{\delta x_i^2}{\beta_4} + \frac{\delta x_i^2}{\beta'_4} + \frac{2\delta y_j}{\delta x_i + \delta x_{i+1}}\right)$$
$$C_{P_{i,j}} = -\frac{\delta t}{\rho}\left(\frac{2\delta y_j}{\delta x_i + \delta x_{i+1}}\right)$$
$$D_{P_{i,j}} = \frac{\delta t}{\rho}\frac{\delta x_i^2}{\beta'_4}P^{n+1}_{i,j+1} + \frac{\delta t}{\rho}\frac{\delta x_i^2}{\beta_4}P^{n+1}_{i,j-1} +$$
$$(U^{n+1}_{eq} - \hat{U}^{n+1}_{i+1,j})\delta y_j + (\hat{V}^{n+1}_{i,j} - \hat{V}^{n+1}_{i,j+1})\delta x_i$$
(۴۱)

$$\hat{U}_{i+1,j}^{n+1}=\left[\frac{(U_{eq}^{n+1}+2U_{i+1,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_i+\delta x_{i+1})}\right]U_{eq}^{n+1}-\left[\frac{(U_{i+2,j}^{n+1}+2U_{i+1,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_i+\delta x_{i+1})}\right]U_{i+2,j}^{n+1}$$
$$+\left[\frac{\delta t}{8\delta y_j}(V_{i+1,j}^{n+1}+V_{i+1,j+1}^{n+1}+V_{i,j+1}^{n+1}+V_{i,j}^{n+1})\right]$$
$$(U_{i+1,j-1}^{n+1}-U_{i+1,j+1}^{n+1})+U_{i+1,j}^{n} \qquad (۴۲)$$

$$\hat{V}_{i,j}^{n+1}=\left[\frac{\delta t\,\delta x_i}{8\beta_4}(V_{i,j-1}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})\right]V_{i,j-1}^{n+1}+$$
$$\left[\frac{\delta t}{8\beta_4}(\delta y_j+\delta y_{j-1})(U_{i+1,j}^{n+1}+U_{i+1,j-1}^{n+1}+2U_{eq}^{n+1})\right]V_{eq}^{n+1}$$
$$-\left[\frac{\delta t\,\delta x_i}{8\beta_4}(V_{i,j+1}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})\right]V_{i,j-1}^{n+1}-$$
$$\left[\frac{\delta t}{16\beta_4}(\delta y_j+\delta y_{j-1})(U_{i+1,j}^{n+1}+U_{i+1,j-1}^{n+1}+2U_{eq}^{n+1})\right]V_{i+1,j}^{n+1}$$
$$+\left[\frac{1}{4\beta_4}\delta x_i(\delta y_j+\delta y_{j-1})\right]V_{i,j}^{n}-\frac{1}{2\beta_4}g\,\delta x_i(\delta y_j+\delta y_{j-1})\delta t \qquad (۴۳)$$

$$\hat{V}_{i,j+1}^{n+1}=\left[\frac{\delta t\,\delta x_i}{8\beta'_4}(V_{i,j}^{n+1}+2V_{i,j+1}^{n+1})\right]V_{i,j}^{n+1}+$$
$$\left[\frac{\delta t}{8\beta'_4}(\delta y_{j+1}+\delta y_j)(U_{i+1,j+1}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n+1}+2U_{eq}^{n+1})\right]V_{eq}^{n+1}$$
$$-\left[\frac{\delta t\,\delta x_i}{8\beta'_4}(V_{i,j+2}^{n+1}+2V_{i,j+1}^{n+1})\right]V_{i,j+2}^{n+1}-$$
$$\left[\frac{\delta t}{16\beta'_4}(\delta y_{j+1}+\delta y_j)(U_{i+1,j+1}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n+1}+2U_{eq}^{n+1})\right]V_{i+1,j+1}^{n+1}$$
$$+\left[\frac{\delta x_i}{2\beta'_4}(\delta y_{j+1}+\delta y_j)\right]V_{i,j+1}^{n+1}-\frac{1}{2\beta'_4}g\,\delta x_i(\delta y_{j+1}+\delta y_j)\delta t$$
(۴۴)

$$\beta_4=\frac{1}{2}(\delta y_j+\delta y_{j-1})\delta x_i+\frac{\delta t}{16}(\delta y_j+\delta y_{j-1})(U_{i+1,j}^{n+1}+U_{i+1,j-1}^{n+1}+2U_{eq}^{n+1})$$
$$\beta'_4=\frac{1}{2}(\delta y_{j+1}+\delta y_j)\delta x_i+\frac{\delta t}{16}(\delta y_{j+1}+\delta y_j)(U_{i+1,j+1}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n+1}+2U_{eq}^{n+1})$$
(۴۵)

۱۱- ضرائب معادلات جبري حاكم بر احجام محدود مرزي تيپ ۶

در احجام محدود مرزي تيپ ۶ تغييرات سرعت u و فشار P در راستاي افق صفر است بنابراين سرعت u در وجوه غربي و شرقي يكسان است لذا ضرايب معادلات جبري حاكم بصورت ذيل به دست مي‌آيند:

$$A_{U_{i,j}}=-\frac{(U_{i-1,j}^{n+1}+2U_{i,j}^{n+1})\delta t}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}$$
$$B_{U_{i,j}}=1+\frac{3U_{i,j}^{n+1}.\delta t}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}$$
$$C_{U_{i,j}}=0$$
$$D_{U_{i,j}}=\left[\frac{\delta t}{8\delta y_j}(2V_{eq}^{n+1}+V_{i-1,j+1}^{n+1}+V_{i-1,j}^{n+1})\right]$$
$$(U_{i,j-1}^{n+1}-U_{i,j+1}^{n+1})+U_{i,j}^{n}-(\frac{2\delta t}{\rho(\delta x_{i-1}+\delta x_i)})\left[P_{i,j}^{n+1}-P_{i-1,j}^{n+1}\right]$$
(۴۶)

$$A_{V_{i,j}}=0,\quad B_{V_{i,j}}=1,\ C_{V_{i,j}}=0\ ,D_{V_{i,j}}=V_{i,j+1}^{n+1}$$
(۴۷)

$$A_{P_{i,j}}=-1\ ,\ B_{P_{i,j}}=1\ ,\ C_{P_{i,j}}=0\ ,D_{P_{i,j}}=0 \qquad (۴۸)$$

۱۲- ضرايب معادلات جبري حاكم بر احجام محدود مرزي تيپ ۷

در احجام محدود مرزي تيپ ۷ سرعتهاي u , v در وجه غربي برابر سرعتهاي زلزله مي‌باشند همچنين فشار در محل سطح آزاد صفر است و سرعت افقي در وجوه شمالي و جنوبي يكسان است. عرض حجم كنترل (δy) به علت تغييرات پروفيل سطح آزاد مخزن متغير بوده و تابع زمان مي‌باشد، لذا ضرائب معادلات جبري حاكم به صورت ذيل به دست مي‌آيند:

$$A_{u_{i,j}}=0\ ,\ B_{u_{i,j}}=1\ ,\ C_{u_{i,j}}=0\ ,\ A_{u_{i,j}}=0 \qquad (۴۹)$$

$$A_{V_{i,j}}=0$$
$$B_{V_{i,j}}=\frac{1}{2}\delta x_i(2\delta y_{i,j}^{n+1}+\delta y_{j-1})+\frac{1}{8}(U_{eq}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n+1})(2\delta y_{i,j}^{n+1}+\delta y_{j-1})\delta t$$
$$C_{V_{i,j}}=\frac{1}{8}(U_{eq}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n+1})(2\delta y_{i,j}^{n+1}+\delta y_{j-1})\delta t$$
$$D_{V_{i,j}}=\left[\frac{1}{4}(U_{eq}^{n+1}+U_{i+1,j}^{n+1})(2\delta y_{i,j}^{n+1}+\delta y_{j-1})\delta t\right]V_{eq}^{n+1}$$
$$-\left[\frac{1}{2}\delta x_i\delta t\right](V_{i,j+1}^{n+1})^2$$
$$+\left[\frac{1}{8}\delta x_i\delta t\right](V_{i,j}^{n+1})^2+\left[\frac{1}{8}\delta t\,\delta x_i(V_{i,j-1}^{n+1}+2V_{i,j}^{n+1})\right]V_{i,j-1}^{n+1}$$
$$+\left[\frac{1}{2}\delta x_i(2\delta y_{i,j}^{n+1}+\delta y_{j-1})\right]V_{i,j}^{n}-\frac{1}{2}\delta x_i\delta t(2\delta y_{i,j}^{n+1}$$

$$+\,\delta y_{j-1})\,g+\frac{1}{\rho}\delta x_i\,\delta t P^{n+1}_{i,j-1} \qquad (۵۰)$$

$$A_{P_{i,j}}=0,\ B_{P_{i,j}}=1,\ C_{P_{i,j}}=0,\ D_{P_{i,j}}=0 \qquad (۵۱)$$

۱۳- ضرایب معادلات جبري حاكم بر احجام محدود مرزي تيپ ۸

فشار در محل سطح آزاد صفر است و سرعت افقي در وجوه شمالي و جنوبي يكسان است. عرض حجم‌كنترل (δy) به علت تغييرات پروفيل سطح آزاد مخزن متغير بوده و تابع زمان مي‌باشد، لذا ضرائب معادلات جبري حاكم به صورت ذيل به دست مي‌آيند:

$$A_{u_{i,j}}=-\frac{\delta t(U^{n+1}_{i-1,j}+2U^{n+1}_{i,j})}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)},\ B_{u_{i,j-1}}=1,$$

$$C_{u_{i,j}}=\frac{\delta t(U^{n+1}_{i+1,j}+2U^{n+1}_{i,j})}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}$$

$$D_{u_{i,j}}=U^{n}_{i,j}-\frac{2\delta t}{\rho(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}\left[\frac{\delta y^{n+1}_{i,j}}{2\delta y^{n+1}_{i,j}+\delta y_{j-1}}P^{n+1}_{i,j-1}-\frac{\delta y^{n+1}_{i-1,j}}{2\delta y^{n+1}_{i-1,j}+\delta y_{j-1}}P^{n+1}_{i-1,j-1}\right] \qquad (۵۲)$$

$$A_{v_{i,j}}=-\frac{\delta t}{4\delta x_i}(U^{n+1}_{i,j}+U^{n+1}_{i+1,j}),\quad B_{v_{i,j-1}}=1,$$

$$C_{v_{i,j}}=\frac{\delta t}{4\delta x_i}(U^{n+1}_{i,j}+U^{n+1}_{i+1,j})$$

$$D_{v_{i,j}}=\left[\frac{\delta t(V^{n+1}_{i,j-1})+2V^{n+1}_{i,j}}{4(2\delta y^{n+1}_{i,j}+\delta y_{j-1})}\right]V^{n+1}_{i,j-1}+\left[\frac{\delta t V^{n+1}_{i,j}}{4(2\delta y^{n+1}_{i,j}+\delta y_{j-1})}\right]V^{n+1}_{i,j}+\left[\frac{\delta t V^{n+1}_{i,j+1}}{2\delta y^{n+1}_{i,j}+\delta y_{j-1}}\right]V^{n+1}_{i,j+1}+V^{n}_{i,j}-g\delta t+\frac{2\delta t}{\rho(\delta y^{n+1}_{i,j}+\delta y_{j-1})}P^{n+1}_{i,j-1} \qquad (۵۳)$$

$$A_{P_{i,j}}=0,\ B_{P_{i,j}}=1,\ C_{P_{i,j}}=0, \qquad (۵۴)$$

۱۴- ضرایب معادلات جبري حاكم بر احجام محدود مرزي تيپ ۹

فشار در محل سطح آزاد صفر است و سرعت افقي در وجوه شمالي و جنوبي يكسان است. همچنين سرعت افقي در وجوه شرقي و غربي نيز يكسان است. عرض حجم‌كنترل (δy) به علت تغييرات پروفيل سطح آزاد مخزن متغير بوده و تابع زمان مي‌باشد، لذا ضرائب معادلات جبري حاكم به صورت ذيل به دست مي‌آيند:

$$A_{u_{i,j}}=-\frac{\delta t(U^{n+1}_{i-1,j}+2U^{n+1}_{i,j})}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)},$$

$$B_{u_{i,j}}=1+\frac{3\delta t U^{n+1}_{i,j}}{4(\delta x_{i-1}+\delta x_i)},\ C_{u_{i,j}}=0$$

$$D_{u_{i,j}}=U^{n}_{i,j}-\frac{2\delta t}{\rho(\delta x_{i-1}+\delta x_i)}\left[\frac{\delta y^{n+1}_{i,j}}{2\delta y^{n+1}_{i,j}+\delta y_{i,j-1}}P^{n+1}_{i,j-1}-\frac{\delta y^{n+1}_{i-1,j}}{2\delta y^{n+1}_{i-1,j}+\delta y_{i,j-1}}P^{n+1}_{i-1,j-1}\right] \qquad (۵۵)$$

$$A_{v_{i,j}}=0,\ B_{v_{i,j}}=1,\ C_{v_{i,j}}=0,\ D_{v_{i,j}}=V^{n+1}_{i,j+1} \qquad (۵۶)$$

$$A_{P_{i,j}}=0,\ B_{P_{i,j}}=1,\ C_{P_{i,j}}=0,\ D_{P_{i,j}}=0 \qquad (۵۷)$$

۱۵- الگوريتم حل

با به دست آمدن معادلات جبري حاكم، مي‌توان دستگاههاي معادلات فشار p و سرعتهاي u و v را تشكيل داد. چون معادلات ديفرانسيل حاكم كوپله هستند، دستگاههاي معادلات جبري نيز كوپله‌اند و جهت حل مجموعه آنها از روش تكرارSIMPLE [۲۲و۲۶] استفاده مي‌شود و هر دستگاه نيز خود با استفاده از الگوريتم توماس به صورت جاروكردن خط‌به‌خط از طرف سد به سمت بالادست دور حل مي‌گردد. براي شروع فرايند تكرار، مقادير اوليه‌اي را براي ميدانهاي سرعت و فشار حدس مي‌زنيم، همچنانكه الگوريتم پيش مي‌رود مقادير حدسي اوليه تدريجاً بهبود مي‌يابند. اين فرايند تكرار تا همگرايي ميدانهاي سرعت و فشار ادامه پيدا مي‌كند.

الگوريتم حل به شرح ذيل مي‌باشد:

۱- در نظر گرفتن مقادير اوليه v,u,p براي آغاز گام زماني اول

۲- در نظر گرفتن مقادير اوليه v,u,p به عنوان مقادير حدسي جواب براي گام زماني اول

۳- واردكردن ابعاد مخزن و پارامترهاي ساخت شبكه و اندازه گامهاي زماني (δt) و تعداد آنها و شتابهاي زلزله

۴- خواندن شتابهاي زلزله براي هر گام زماني

۵- محاسبه سرعتهاي مجازي $\hat{U}$ و $\hat{V}$

۶- محاسبه ضرائب معادلات فشار و حل دستگاههاي معادلات فشار براي به دست آمدن P ها

۷- محاسبه ضرائب معادلات سرعت u و حل دستگاههاي معادلات سرعت u براي به دست آمدن u ها با استفاده از P به دست آمده.

۸- محاسبه ضرائب معادلات سرعت v و حل دستگاههاي معادلات سرعت v براي به دست آمدن vها با استفاده ازP و u .

۹- کنترل همگرايي v,u,p

۱۰- جايگزين کردن مقادير حدسي جواب $v\ ,\ u\ ,\ p$ با مقادير محاسبه شده و تکرار مراحل ۵ تا ۹ تا حصول همگرايي

۱۱- محاسبه نيرو و لنگر وارد بر سد با انتگرال‌گيري از فشارها بر روي بدنه سد

۱۲- در نظر گرفتن مقادير $v\ ,\ u\ ,\ p$ همگرا شده به عنوان مقادير اوليه و مقادير حدسي جواب گام زماني بعدي

۱۳- شروع گام زماني بعدي و تکرار مراحل ۴ تا ۱۱ تا گام زماني آخر

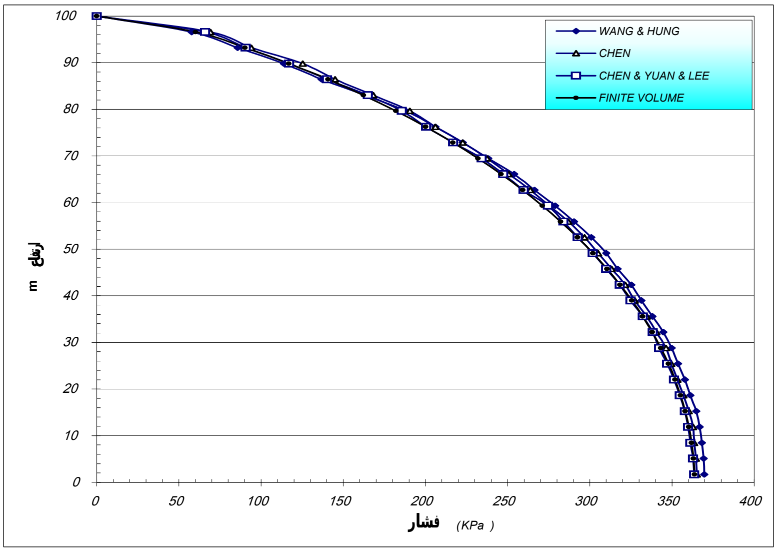
۱۴- پايان

۱۶- عملکرد مدل و ارائه نتايج

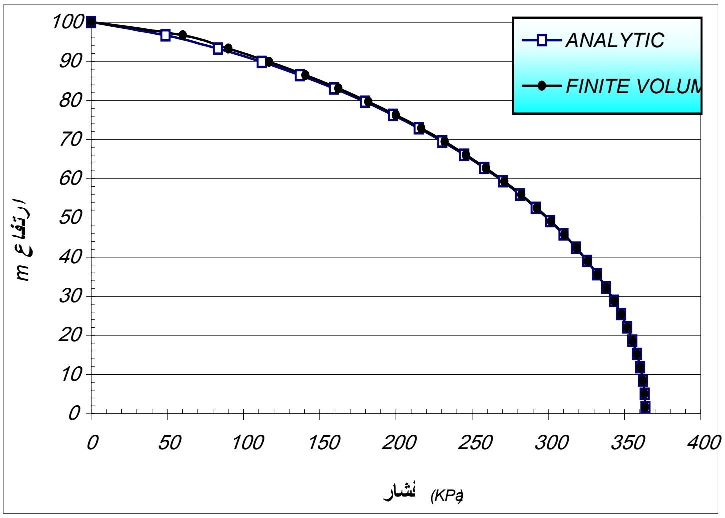
يکي از پارامترهاي مهم در محاسبه فشارهاي هيدروديناميک آب بر سد، انتخاب طول مخزن مناسب و کافي براي مدل است. طول مخزن به طريقي انتخاب شده است که با افزايش آن تأثيرش بر محاسبات به‌حالت مجانب برسد که در نتيجه طول مناسب مخزن معادل سه برابر عمق مخزن به دست آمد که اين نتيجه با نتايج محققان ديگر ازجمله باستامانت و فلورس [۱] و هونگ و ونگ (۱۹۸۷) همخواني دارد.

جهت بررسي صحت و دقت مدل تهيه شده، نتايج حاصل با نتايج به دست آمده توسط ونگ و هونگ [۱۷] و چن [۳] از مدل دوبعدي و چن، يوان و لي [۶] از مدل سه‌بعدي به روش تفاضلات محدود، مقايسه گرديد. طبق شکل (۵) نتايج به يکديگر بسيار نزديکند که مبين صحت و دقت بالاي مدل تهيه شده مي‌باشد.

براي بررسي اثر امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي بر فشارهاي هيدروديناميک وارد بر وجه بالادست بدنه سد، مقايسه‌اي بين نتايج حاصل از مدل تهيه شده و روش تحليلي چوپرا انجام شده است. طبق شکل (۶) نتايج حاصل از دو روش بهم نزديکند، اما با حرکت از کف مخزن به طرف سطح آب اختلاف آنها افزايش مي‌يابد به طوريکه در نزديکي سطح آب فشارهاي هيدروديناميک وارد بر سد حاصل از روش احجام محدود ۱۹ درصد بزرگتر از نتايج به دست آمده از روش تحليلي است. به بيان ديگر صرفنظر از اثر امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي موجب گرديده که فشارهاي هيدروديناميک وارد بر نيمه فوقاني وجه بالادست سد بطور ميانگين ۳ درصد کاهش يابند و از کل نيروي هيدروديناميک وارد بر سد ۰/۵ درصد کاسته شود.



شکل ۵- توزيع فشارهاي هيدروديناميک وارد بر وجه بالادست سد حاصل از روش احجام محدود و روش تفاضلات محدود (ونگ و هونگ (۱۹۹۰) ، چن(۱۹۹۴) و چن، يوان و لي (۱۹۹۹)) تحت اثر شتاب افقي a_x=0.5g



شكل ۶- توزيع فشارهاي هيدروديناميك وارد بر وجه بالادست سد حاصل از روش احجام محدود و روش تحليلي چوپرا تحت اثر شتاب افقي a_x=0.5g (H=100, L=300)

۱۷- تحليل حساسيت مدل

جهت بررسي حساسيت مدل نسبت به تعداد حجم‌كنترلهاي شبكه يا به عبارت ديگر بررسي ميزان دقت نتايج به دست آمده از شبكه‌هاي با تعداد حجم‌كنترلهاي متفاوت، مخزني با ابعاد ثابت، به عمق ۱۰۰ متر و طول ۳۰۰ متر تحت اثر شتاب افقي ثابت a_x=0.5g و با استفاده از شبكه‌هاي مختلف M×N آناليز گرديد كه N,M پارامترهاي شبكه و بترتيب تعداد حجم‌كنترلها در امتداد طول و عمق مخزن مي‌باشند.

نتايج حاصل شامل فشار هيدروديناميكي وارد بر وجه بالادست سد در تراز كف مخزن، زمان صرف شده جهت انجام محاسبات و ميزان خطاي نتايج، ناشي از كاهش تعداد حجم‌كنترلهاي شبكه در مقايسه با نتايج به دست آمده از شبكه ۳۰*۳۰ كه در كليه محاسبات از آن استفاده شده، در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به كوتاه بودن زمان زلزله اندازه مناسب گام زماني مورد بررسي قرار گرفت. گام زماني برابر با 0.001 ثانيه به عنوان گام زماني مناسب از نظر دقت بدست آمد. كامپيوتر محاسبه كننده از نوع *P4* با سرعت 1.8 GHz مي‌باشد.

همانگونه كه مشاهده مي‌شود تفاوت نتايج بسيار ناچيز است به گونه‌اي كه اختلاف فشارهاي حاصل از شبكه ۱۲*۱۲ و شبكه ۳۰*۳۰ تنها ۱% است و اين بيانگر دقت بالاي مدل تهيه شده حتي براي شبكه‌هاي با تعداد حجم‌كنترلهاي كم مي‌باشد، اين در حالي است كه در مدل تهيه شده با استفاده از روش تفاضلات محدود توسط چن، يوان و لي [۶] حداقل شبكه پيشنهاد شده جهت آناليز همين مسئله، يك شبكه 50×50 المان مي‌باشد، بنابراين مدل حاضر نتايج دقيق را به ازاي تعداد المانهاي كمتر نسبت به مدل تهيه شده با روش تفاضلات محدود، ارائه مي‌كند. با توجه به مطلب فوق در مدل تهيه شده با استفاده از روش احجام محدود بقاء كامل كميتهايي مانند جرم و اندازه حركت براي هر گروهي از حجم كنترلها و البته براي كل حوزه محاسباتي برقرار مي‌باشد. اين خاصيت براي هر تعداد از حجم كنترلها و حتي براي وقتي كه تعداد آنها كم شود صادق است بنابراين حتي جواب مربوط به شبكه خشن، موازنه دقيق را نشان خواهد داد.

۱۸- مثال: محاسبه فشارهاي هيدروديناميكي وارد بر وجه بالادست يك سد بتني

جهت مطالعه و ارزيابي نحوه توزيع فشارهاي هيدروديناميكي آب بر وجه بالادست سد، سدي به ارتفاع ۱۰۰ متر با وجه بالادست مايل ($\beta=45^0$) و مخزني به عمق ۱۰۰ متر و طول ۳۰۰ متر تحت اثر مؤلفه افقي، مؤلفه قائم و اثر همزمان هر دو مؤلفه ركورد زلزله زنجيران در مدت يك ثانيه توسط برنامه كامپيوتري تهيه شده، تحليل شده است. اين زلزله توسط شتابنگاشت مستقر در ايستگاه ميمند در استان فارس در ۱۹

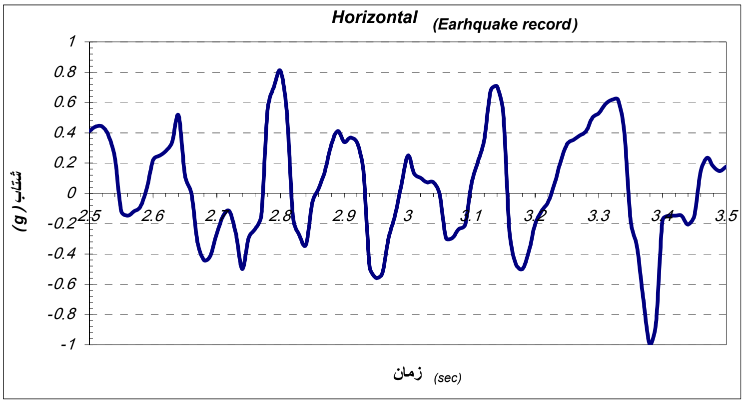
ژوئن سال ۱۹۹۴ به ثبت رسیده است. رکورد هر دو مؤلفه افقـي و قائم شتاب اين زلـزلـه در فاصله زماني ۲/۵ الـي ۳/۵ ثانيـه در شكل (۷) نشان داده شده است. نتـايج حاصـل از تحليـل شـامل نمودارهاي توزيع فشارهاي هيدروديناميك وارد بر وجه بالادسـت سد در زمانهاي مختلف در ادامه نشان داده شده است.

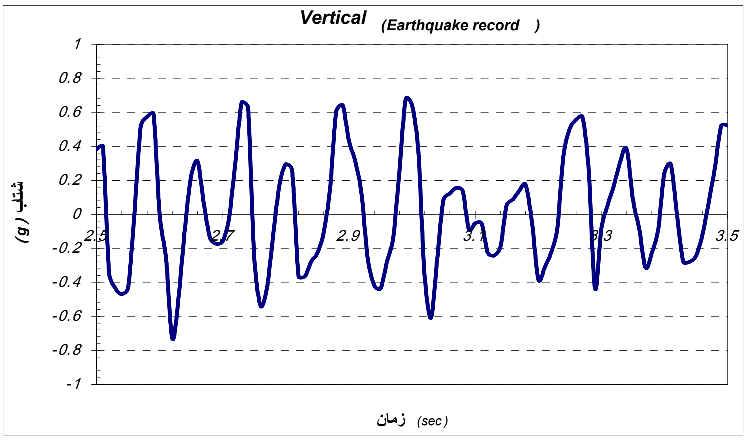
توزيع فشارهاي هيدروديناميكي ناشي از شتابهاي افقي و قائم و تركيب آنها در شكلهاي (۸ تا ۱۰) نشان داده شده است.

ملاحظه مي شود كه فشارهاي هيدروديناميكي وارد بر وجه بالادست سد، بستگي به ركورد شتاب وارده، مثبت، منفي و يا تركيبي از هردو ميباشد. در زمانهاي مختلف سرعت و جهت جريان تغيير مينمايد و اين تغييرات با توجه به معادلات ناوير-استوكس باعث تغيير توزيع فشار ميشود.

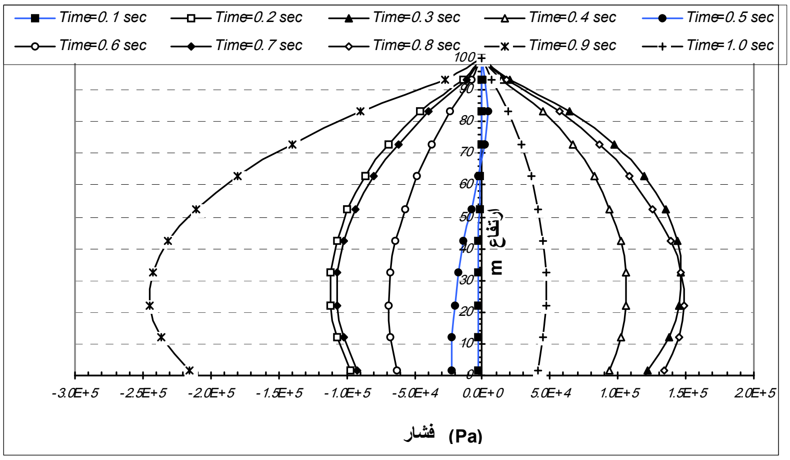
جدول ۱- نتايج تحليل حساسيت

M×N	Pressure (Pa)	Time (sec)	% error
5×5	387641	37	6.6
6×6	379426	60	4.4
7×7	374834	96	3.1
8×8	372024	145	2.3
9×9	370183	194	1.8
10×10	368910	246	1.5
12×12	367310	355	1
30×30	363608	2234	0
50×50	363605	5836	0

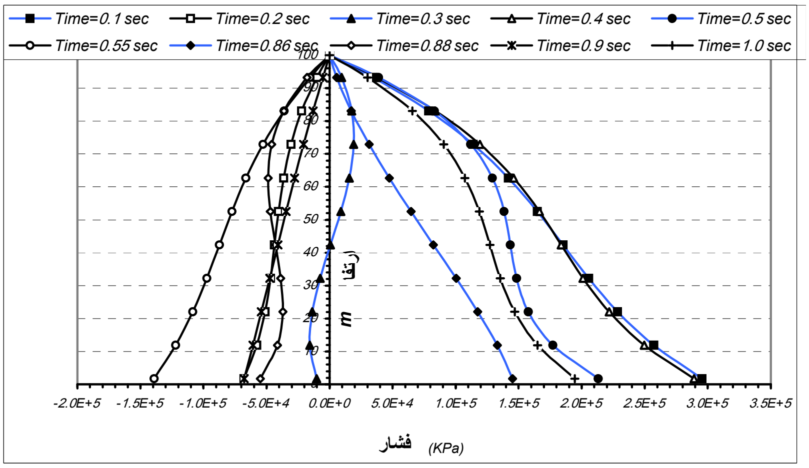




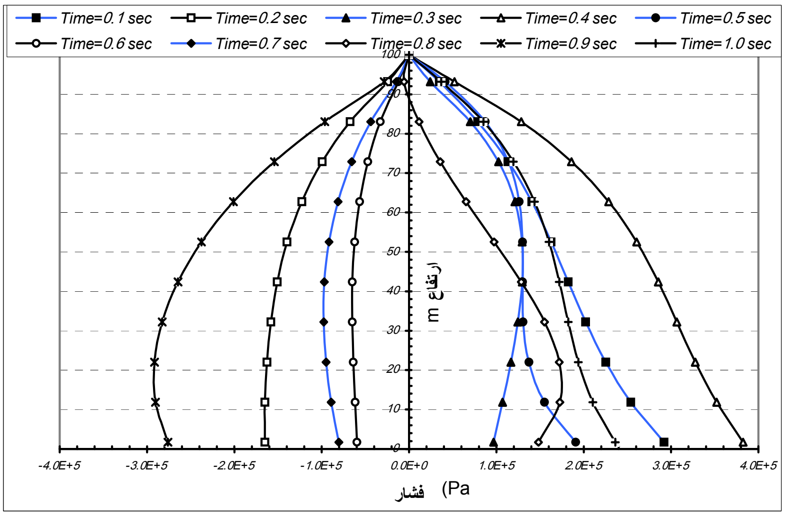
شكل ۷- ركورد شتاب افقي و قائم زلزله زنجيران در فاصله زماني ۲/۵ تا ۳/۵ ثانيه



شکل ۸- توزیع فشارهاي هیدرودینامیکي وارد بر وجه بالادست سد تحت اثر تحريك افقي زلزله در زمانهاي مختلف



شکل ۹- توزیع فشارهاي هیدرودینامیکي وارد بر وجه بالادست سد تحت اثر تحريك قائم زلزله در زمانهاي مختلف



شکل ۱۰- توزیع فشارهاي هیدرودینامیکي وارد بر وجه بالادست سد تحت اثر همزمان تحريك افقي و قائم زلزله در زمانهاي مختلف

نتیجه‌گیری

به دليل گستردگي پديدههاي محيطي مؤثر بـر روي سـدها و پيچيدگي ساخت مدلهاي آزمايشگاهي و بـا توجـه بـه پيـشرفت سريع رايـانههـا در دو دهـه اخيـر، مـدلسازي عـددي بـه عنـوان ارزانترين و مؤثرترين ابزار محاسبه بارها و ارزيابي رفتار اين سازه تحت اثر زمين لرزهها محسوب ميشود.

در ايـن تحقيق براي انجام محاسبات كامپيوتري برنامهاي بـه زبان ويژوال بيسيك تهيه گرديد كه با استفاده از آن فشارهاي هيدروديناميكي آب و مؤلفههاي سرعت آب با در نظر گرفتن اثر امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي در كليه نقاط مخزن از جمله روي وجه بالادست سد و همچنين نيمرخ سطح آب مخزن تحت اثر مؤلفه‌هاي افقي و قائم زلزله، محاسبه گرديده است. مقايسه نتايج حاصل از مدل تهيه شده با نتايج محققان ديگر نشان ميدهد كه مدل داراي صحت و دقت خوبي ميباشد. در شبكهبندي مدل، طول مناسب مخزن معادل سه برابر عمق مخزن به دست آمد كه با نتايج محققان ديگر همخواني دارد. نتايج حاصله از مدل تهيه شده همچنين نشان ميدهد كه صرفنظر كردن از اثر امواج سطحي و شتاب انتقالي غيرخطي موجب كاهش فشارهاي هيدروديناميك وارد بر نيمه فوقاني وجه بالادست ميشود.

فشارهاي ديناميكي ناشي از شتاب قائم زمين قابل توجه بوده و لذا بايد در تحليلها منظور شود. شيب وجه بالادست سد بر ميزان فشارهاي هيدروديناميكي و ارتفاع امواج سطحي مؤثر است به طوريكه با كاهش شيب وجه بالادست سد با افق فشارهاي هيدروديناميكي و ارتفاع امواج سطحي در تحريك افقي زلزله كاهش و بر عكس در تحريك قائم زلزله افزايش مييابند. در سدهاي با وجه بالادست مايل، اثر غيرخطي شتاب انتقالي بر فشارهاي هيدروديناميك وارد بر وجه بالادست سد بزرگتر از حالتي است كه در آن وجه بالادست قائم است و ميزان آن بستگي به پيچيدگي هندسه سيستم سد و مخزن دارد. بنابراين انجام تحليل غيرخطي براي سيستمهاي داراي مخزن غير مستطيلي ضروري است.

مدل تهيه شده براي شبكه حجم كنترلهاي درشت نيز نتايج خوبي ميدهد زيرا در روش احجام محدود به دليل محاسبه سرعتها روي مرز حجم كنترلها، پيوستگي صد در صد ارضاء ميشود حتي اگر حجم كنترلها بزرگ در نظر گرفته شوند.

مراجع

[1] Bustamante, J. I. and Flores, A., (1966), “Water pressure on dams subjected to earthquakes”. Journal of engineering mechanics, ASCE, 93, EM5: 115-127.

[2] Chakrabarti, P. ,and Chopra, A. K., (1973), “Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction. ” Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2: 143-160.

[3] Chen, B. F., (1994), “Nonlinear hydrodynamic pressure on dam faces with arbitrary reservoir shapes”, Journal of Hydraulic Research, Vol. 32, No. 3, PP. 401-413.

[4] Chen, B. F., (1996),“Nonlinear hydrodynamic effects on concrete dam”, Engrg. Str., 18 (3), PP. 201-212.

[5] Chen, B. F. and Yuan, Y. S., (1999), “Nonlinear hydrodynamic pressures on rigid arch dams during earthquakes,” in reviewing, J. Hydraulic Engineering.

[6] Chen, B. F. , Yuan, Y. S. and Lee, J. F. ,(1999), “Three dimensional nonlinear hydrodynamic pressures by earthquake on dam faces with arbitrary reservoir shapes. “Journal of Hydraulic Research, Vol. 37, No. 2, PP. 163-187.

[7] Chopra, A. K., (1967). “Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes. “Journal of Engineering Mechanics Division Proceeding of the ASCE, Vol. 93, No. 6, PP. 205-223.

[8] Chopra, A. K. and Fenves, G. (1984), “Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam – water - foundation rock interaction”, Earthq. Engrg. Struc. Dyn., Vol. 12, PP. 663-680.

[9] Chopra, A. K. and Fok, K. L., (1986),” Earthquake analysis of arch dams including dam-water interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility”, Earthg. Engrg Struc. Dyn., 14(2), PP.155-184.

[10] Chopra, A. K. and Hall, J. F., (1982),” Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, PP. 333-345.

[11] Chopra, A. K., and Chakrabarti, P. (1981), “Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction”. Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 19.

[12] Chopra, A. K. and Chakrabarti, P., (1973), “Hydrodynamic pressures and response of gravity dams to vertical earthquake

components". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1: 325-335.

[13]Chwang, A. T., (1978)," Hydrodynamic pressure on sloping dam during earthquakes: Part 2, Exact theroy", J. Fluid Mech., 87, 342-348.

[14]Chwang, A. T., (1983), "Nonlinear hydrodynamic pressure on an accelerating plate" J. Physics Fluids, 26(2), PP. 383-387.

[15]Humar, J. L. and Chandrashaker, R., (1993). "Fluid- Foundation interaction in the siemic response of gravity dams." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, PP. 1067-1084.

[16]Hung, T. K. and Chen, B. F., (1990), "Nonlinear hydrodynamic pressures on dams", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No. 6, PP. 1372-1391.

[17]Hung, T. K. and Wang, M. H., (1987), "Nonlinear hydrodynamic pressure on rigid dam motion," J. Engrg Mech., 113(4), PP. 482-499.

[18]Kotsubo, S. (1959), "Dynamic water pressures on dams due to irregular earthquakes", Mem. Faculty of Engineering, Kyushu University, 18,4 : 119-129.

[19]Lee, G. C., Tsai, C. S. and Yang, R., (1993), "Explicit time domain transmitting boundary for dam- reservoir interaction analysis." International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 36, PP. 1789-1804.

[20]Liu, P. L. F., (1986), "Hydrodynamic pressure on rigid dams during earthquakes", J. Fluid Mech., 165, 131-145.

[21]Lotfi, V., Roesset, J. M. and Tassoulas, J. L., (1987), "A Techniqe for the analysis of the response of dams to earthquake." Earthquake Engineering and structural dynamic, Vol.15, PP. 463-490.

[22]Patankar, S. V. (1980), "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York.

[23]Rosenblueth, E., (1968), "Presion hidrodinamica en presas debida a la acceleration vertical con refraccion en el fondo", II Congress National de Ingenieria Sismica, Veracruz, Mexico.

[24]Saini, S. S., Bettess, P. and Zienkiewicz, O. C., (1978), "Coupled hydrodynamic response of concrete gravity dams using finite and infinte elements." Earthquake Engineering and structural dynamics, Vol.6, PP. 363-374.

[25]Tsai, C. S. and Lee, G. C., (1990), "Method for transient analysis of three dimensional dam reservoir interactions", J. Engrg Mech., Vol. 116, No. 10, 2151-2172.

[26]Van Doormal, J. P. and Raithby, G. D. (1984), "Enhancements of the SIMPLE method for Predicting incompressible fluid flow.", Numer. Heat Transfer, Vol. 7, PP. 147-163.

[27]Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (1995), "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method", Longman, Malaysia, TCP.

[28]Wang, M. H. and Hung, T. K.,(1990). "Three dimensional analysis of Pressure on dams", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No. 6, PP. 1290-1304.

[29]Westergard, H. M., (1933). "Water pressures on dams during earthquakes." Trans., ASCE, New York, N.Y., 98, 418-433.

[30]Zangar, C. N., (1953), "Hydrodynamic Pressures on dams due to horizontal earthquake.", Proc. Soc. Of Experimental stress analysis, Vol. 10, PP. 93-102.

[31]Zienkiewicz, O. C., (1964). "Hydrodynamic Pressure Due to earthquakes", International Journal for Numerical Methods in Engineering., PP. 215-227.

[32]Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P., (1978), "Fluid- Structure dynamic interaction and wave forces" International Journal for Numerical methods in Engineering,Vol.13, PP. 1-16.

[33]Zienkiewicz, O. C. , Bando, K. , Bettess, P. , Emson, C. and Chiam, T. C. , (1985), "Mapped infinite elements for exterior wave problems". Int. Jour. Num. Methods Engng. Vol. 21, 1229-1251.