



## مطالعه عملکرد لرزه‌ای میل مهارها در مخازن فلزی ذخیره مایعات به روش جرم اضافی

ندامیرزاده<sup>۱</sup>، عرفان علوی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه، [n.mirzadeh@sazeh.co.ir](mailto:n.mirzadeh@sazeh.co.ir)

۲- دکترای مهندسی عمران

### چکیده

تغییر شکلهای پیچیده مخازن حاوی مایعات و اندرکنش بین مایع و سازه مخزن در حین زلزله موجب مکانیزمهای مختلفی از خسارت می گردد. خرابی میل مهارها (انکربولتها)، خرابیهای پایه مخزن از قبیل کماتش پافیلی، کماتش الماسی ورق جداره، تغییر شکلهای زیاد و خرابی در ورق بالای مخزن و یا سقف آن ناشی از بار امواج (sloshing)، نشستهای ناهمگون در فونداسیون و کف مخزن از مدلهای غالب خرابی مخازن فلزی تحت بارهای بزرگ جانبی به حساب می آیند. در این مقاله از میان مدلهای خرابی، خرابی میل مهارها در مخازن فلزی مهارشده به روش کنترل-نیرو مطالعه شده است. دلیل این امر، اهمیت نقش خرابی انکربولتها در پایداری سازه مخازن به ویژه در مناطق با خطر نسبی بالای زلزله می باشد. برای این منظور یک مخزن استوانه ای با نسبت  $H/D=0.8$  به عنوان نمونه انتخاب گردیده و بارگذاری لرزه ای به روش دینامیکی طیفی بر روی دو نوع مدل سازی مختلف از سیستم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تحلیلها مقایسه شده اند. در این مقاله، از روش جرم اضافی (the added mass) بر پایه مدل کردن سازه و مایع درون آن به صورت یک مدل اجزا محدود استفاده شده است. جرم اضافی روشی است که در آن جرم مایع از توزیع فشار مایع بر جدار مخزن منتج شده و بوسیله رابطهایی به بدنه سازه متصل می گردد. روش جرم اضافی، مدل دقیقتری برای مطالعه رفتار دینامیکی و اندرکنش مایع و سازه بویژه اثرات موضعی آن فراهم مینماید. در این تحقیق، نتایج حاصل از روش جرم اضافی با نتایج تئوری هازنر که رفتار لرزه ای مایع درون مخزن را به کمک یک مدل هیدرودینامیکی تقریبی متشکل از دو یا چند جرم سخت و نرم که به فنرهای معادل سختی جانبی مخزن متصل هستند شبیه سازی میکند، مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند که تحلیل دینامیکی با روش جرم اضافی نیروهای بزرگتری نسبت به روش مدل هازنر در میل مهارها ایجاد می کند.

**کلمات کلیدی:** مخازن فلزی، روش جرم اضافی، تحلیل لرزه ای، میل مهار

### ۱. مقدمه

محققان زیادی رفتار لرزه ای تانکهای مهار شده را از نقطه نظر اندرکنش هیدرودینامیکی سازه - مایع مورد مطالعه قرار داده اند. نتایج مطالعات تعدادی از این محققین نشان داده است که تانکهای مهار شده حاوی مایعات تحت بارهای لرزه ای جانبی رفتاری نسبتاً "کنسولی از خود نشان می دهند [۱-۵]. بطور کلی پاسخهای هیدرودینامیکی سیستم سازه - مایع از ترکیب دو مؤلفه با نامهای جرم سخت و جرم موج حاصل می گردد. مؤلفه جرم سخت بیانگر قسمتی از مایع است که به طور یکنواخت با دیواره تانک حرکت می کند. این رفتار زمانی که دیواره تانک صلب باشد،

اتفاق می افتد. جرم موج دربرگیرنده قسمتی از جرم است با پیوند بالا که در سطح فوقانی مایع حرکت می کنند. این مؤلفه ها می توانند به صورت مجزا بررسی شوند زیرا پیوندهای طبیعی آنها به شکل محسوسی با یکدیگر اختلاف دارند. به دلیل آنکه جرم موج معمولاً" مربوط به پیوندهای بالا می باشد، این مؤلفه سهم کوچکی در فشار هیدرودینامیکی دیواره تانک را به خود اختصاص می دهد و به طور عمده رفتار کلی سازه از مؤلفه جرم سخت تأثیر می پذیرد. اندرکنش هیدرودینامیکی سازه - مایع در حین زلزله موجب تغییر شکلهای پیچیده ای در مخازن حاوی مایعات می گردد. این تغییر شکلهای مکانیزه‌های مختلفی از خسارت را ایجاد می کنند. خرابی میل مهارها (انکربولتها)، خرابیهای پایه مخزن از قبیل کمانش پافیلیسی، کمانش الماسی ورق جداره، تغییر شکلهای زیاد و خرابی در ورق بالای مخزن و یا سقف آن ناشی از بار امواج (sloshing)، نشستهای ناهمگون در فنداسیون و کف مخزن از جمله مدلهای متداول خرابی مخازن فلزی تحت بارهای بزرگ جانبی می باشند. Brawn [۴] و Haroun [۵] در مقالاتی خرابی مخازن فلزی ناشی از زلزله های ۱۹۹۴ نورتریج و ۱۹۷۹ امپریال ولی را گزارش کرده اند. [۶] O'Rourke و Sazano [۷] منحنیهای خسارت مخازن فلزی را ارائه دادند. اگرچه این منحنی ها منحصر به خرابی انکربولتها نمی باشند ولی بیانگر اهمیت انکربولتها به عنوان یک عضو مهم در خسارتهای احتمالی تانکهای فلزی می باشند. از اینرو، به دلیل اهمیت خرابی انکر بولتها در خسارت کلی تانکهای فلزی این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته است.

انواع خرابی میل مهارها و نواحی مهار شده به تفصیل در پیوست D آئین نامه [۸] ACI مورد بررسی قرار گرفته است و شرایط حدی مربوط به انواع نیروها در آن تعیین گشته است. اگرچه این خرابیها منحصر به سازه خاصی نیست و کلی می باشد ولی لزوم بررسی مدلسازی دقیق سازه های خاصی چون مخازن حاوی مایعات در تعیین تغییرات نیروی انکربولتها با توجه به محدودیتها و ضوابط آئین نامه امری ضروری به نظر میرسد. شکل ۱ و ۲ نمونه هایی از خرابی انکر بولتها تحت زلزله های بزرگ را نشان می دهد.

یکی از نکات حائز اهمیت در طراحی انکربولتها شیوه مدلسازی مایع درون مخزن می باشد. برای این منظور رویکردهای مختلفی در ادبیات فنی وجود دارد که اولین و ساده ترین روش استفاده از تئوری هازنز میباشد که مخزن و مایع درون آنرا به صورت دو یا چند جرم سخت و نرم به همراه فنرهای معادل سختی جانبی مخزن مدلسازی میکنند. روش دیگری که در این مقاله از آن استفاده شده است، روش جرم اضافی می باشد. در این روش جرم مایع از توزیع فشار مایع بر جدار مخزن منتج شده که بوسیله رابط هایی به بدنه سازه متصل می گردند. در این تحقیق یک مخزن استوانه ای با نسبت  $H/D=0.8$  بعنوان نمونه انتخاب گردیده و نیروی انکرها ناشی از بارگذاری دینامیکی طیفی که به صورت جرم اضافی بر سازه وارد می شود مورد بررسی قرار گرفته شده است.



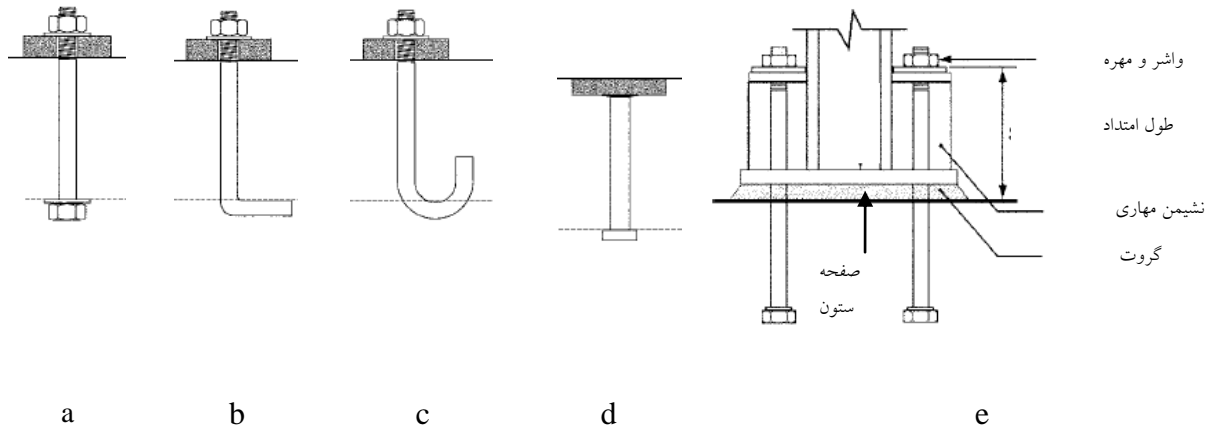
شکل ۱: لغزش انکربولتهای تانک مهارشده در زلزله ۲۰۱۰ شیلی با بزرگای ۸/۸



شکل ۲: تغییر طول انکربولتها در زلزله نیسکوالی

## ۲. طراحی میل مهارها (انکربولتها) تحت بارهای لرزه ای:

میل مهار(انکربولت) المان فولادی است که حین بتن ریزی و یا پس از سخت شدن عضو بتنی در داخل آن قرار داده شده و از آن برای انتقال بار استفاده می شود. مهارهای درجا شامل پیچ های دارای سر، پیچهای قلابدار (به شکل L و J) و گلمیخها هستند(شکل ۳ -  $d \text{ تا } a$ ). مهارهای غیردرجا شامل مهارهای انبساطی، مهارهای فشاری و مهارهای چسبنده می باشند.

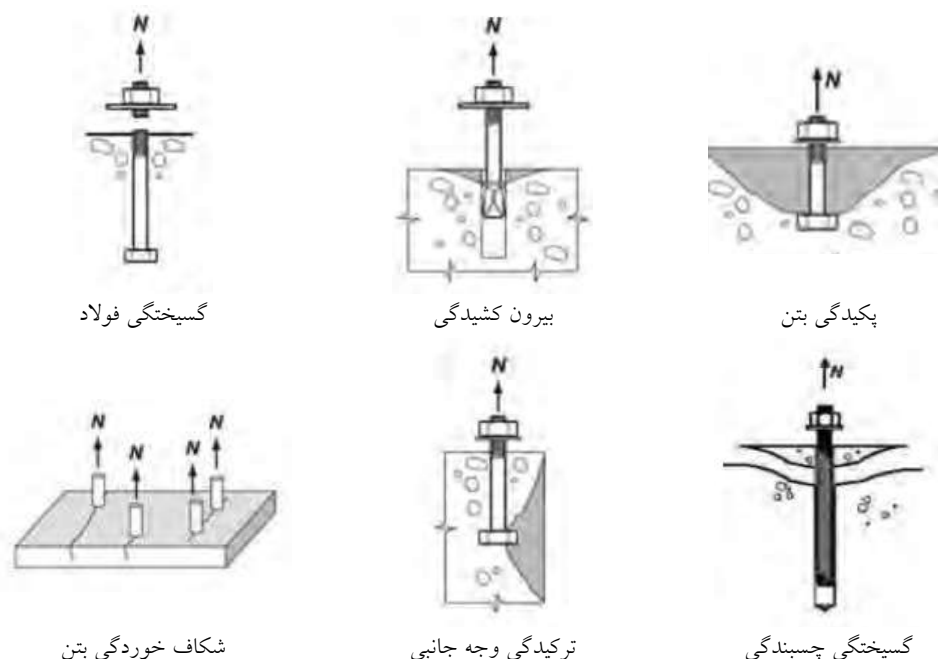


شکل ۳: انواع مهارهای درجا

در مهاریهای درجا طولی از مهار که بعد از بتن امتداد می یابد طول امتداد نامیده می شود. این طول تحت کل بار کششی وارد بر مهار که در سطح مقطع کمینه و ثابت مهار رخ می دهد قرار دارد. این طول عمدتاً" برای بارهای زلزله طراحی می شود در تانکهای مهار شده از انکربولتهای درجا با طول امتداد مشابه شکل ۳- e برای تحمل بارهای زلزله استفاده می شود. عملکرد انکربولتها تحت بارهای جانبی توسط روشهای تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است.

پیوست D آئین نامه ACI ضوابط طراحی مهارهای درجا برای انتقال بارهای سازه از طریق کشش، برش و یا ترکیبی از کشش و برش بیان می کند. مهارها یا گروه مهارهایی که همزمان تحت بارهای محوری و برشی قرار گرفته اند باید به صورتی طراحی شوند که ضابطه زیر را برآورده سازند.

چنانچه برای مقاومت کامل در برش  $V_{ua} \leq 0.2 \phi V_n$  باشد، می توان از رابطه  $\phi N_n \geq N_{ua}$  برای برآورد مقاومت کامل مهار در کشش استفاده گردد. بطوریکه،  $\phi V_n$  و  $N_n$ ، بار محوری و برشی اسمی،  $V_{ua}$  و  $N_{ua}$ ، بار محوری و برشی ضریبدار، و  $\phi$  ضریب کاهش مقاومت(کشش 0.75 و برش 0.65) میباشد. اگر میل مهارها قادر به تحمل نیروی کششی وارده نباشند، خرابی هایی مشابه آنچه در شکل ۴ نشان داده شده رخ می دهد.

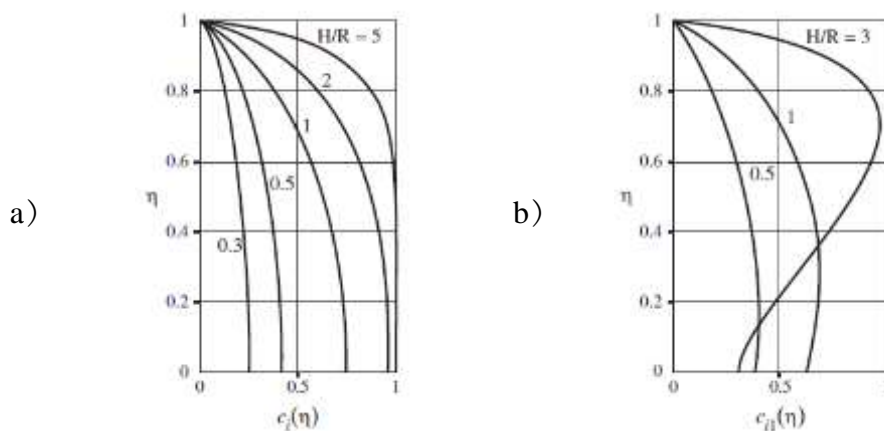


شکل ۴: مدهای گسیختگی کششی برای مهارهای [۸]

### ۳. مدل کردن مایع با روش جرم اضافی:

روش جرم اضافی روشی است که اولین بار توسط [۹] Westergaard در مطالعه اولیه مربوط به اندرکنش دینامیکی بین سد و مخزن مورد توجه قرار گرفت. براساس مطالعات وسترگارد، فشار هیدرودینامیکی که مایع در حین زلزله به دیواره سد وارد می کند به گونه ای است که کسری از حجم مایع همراه با دیواره سد حرکت می کند. وسترگارد دیواره سد را به صورت صلب در نظر گرفته بود. بعدها [۱۰ و ۱۱] Tsai و Lee اندرکنش دینامیکی بین مایع ذخیره شده و دیواره سد را با فرض انعطاف پذیر بودن دیواره مدلسازی نمودند. آنها فرض کردند که دیواره سد به صورت یک تیر برنولی - اولر می باشد و جرم اضافی که در حین تحریک وارد شده و با سازه ارتعاش می کند، از اثر هیدرودینامیکی ناشی از تغییرشکل‌های موجود سازه و پاسخ موجود در کل سیستم حاصل میگردد. در نتیجه روش جرم اضافی تابعی از شکل مدی هم سازه و هم مخزن میباشد. برای مدلسازی تانکهای حاوی مایعات، دو روش جرم اضافی در ادبیات یافت می شود. یکی از آنها روشی است که با هدف مدلسازی رفتار کلی تانک تبیین گشته است (به عنوان مثال تعیین لنگر واژگونی و برش پایه) و از تعدادی جرم متمرکز برای تعریف مؤلفه های فشار استفاده می کند [۱۲ و ۱۳]. روش دیگر، روشی است که برای تحلیل رفتار موضعی تانک به کار گرفته می شود و در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴ و ۱۵ و ۱۶]. در این روش اینرسی بخشی از مایع که به صورت سخت عمل می کند با اینرسی دیواره تانک عملکردی یکپارچه دارد و جرم اضافی از توزیع فشار تانک صلب حاصل می شود. مقادیر جرم اضافی در طول تحریک دینامیکی ثابت در نظر گرفته می شود. اگرچه این فرض با توجه به مطالعات Lee و Tsai الزاماً درست نمی باشد، اما در مورد تانکهای حاوی مایعات، مطالعات [۱۷] Veletsos and Yang و [۱۸] Haroun and Housner نشان داده است که توزیع فشار مؤلفه سخت مایعات در تانکهای صلب و انعطاف پذیر به یکدیگر شباهت دارند، به

خصوص در تانکهای پهن این شباهت بیشتر است. نمودارهای موجود در شکل ۵ بیانگر شباهت در الگوی تغییرات فشار در ارتفاع تانکهای صلب و انعطاف پذیر می باشد. بنابراین روش جرم اضافی که در طول زمان ثابت فرض می شود می تواند برای تانک مورد مطالعه به کار گرفته شود.



شکل ۵: توزیع فشار در ارتفاع تانک (a) تانک صلب، (b) تانک انعطاف پذیر [۲۰]

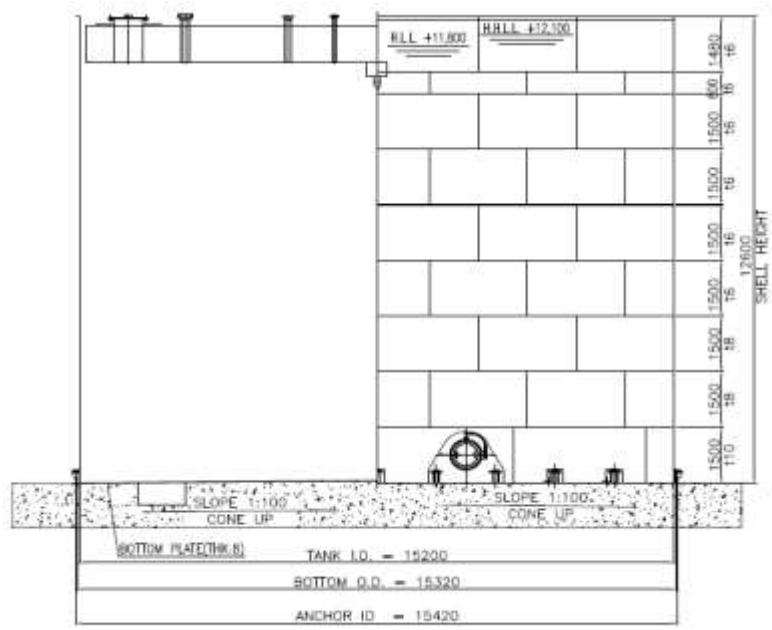
قابل توجه است که مدل جرم اضافی به سادگی در نرم افزارهای اجزاء محدود امکان پیاده سازی دارد. از طرفی مقایسه نتایج تحلیلی با مدل تجربی نتایج مطلوبی را نشان داده اند [۱۲].

#### ۴. تانک فلزی مورد مطالعه تحت عملکرد لرزه ای:

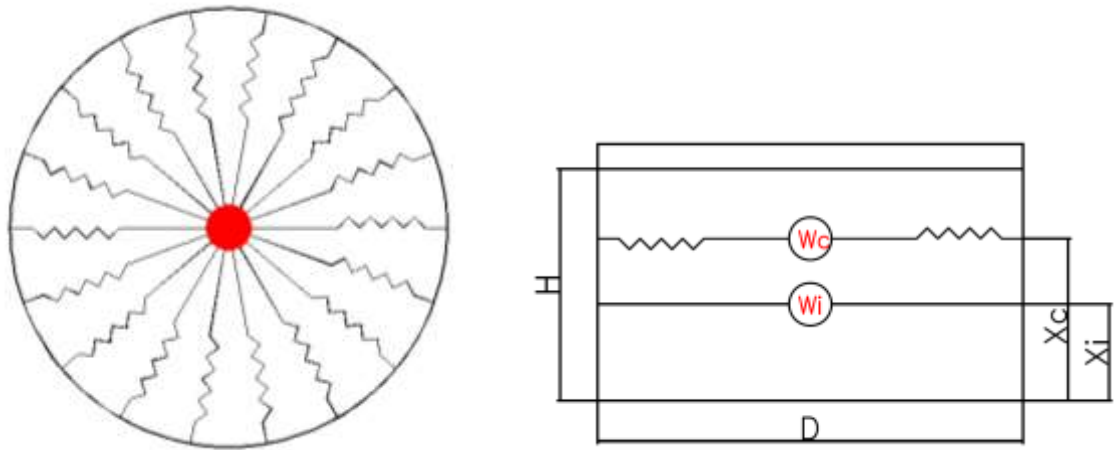
براساس ملاحظات قبلی، یک تانک صلب با نسبت  $H/D = 0.8$  انتخاب شده است. مشخصات هندسی تانک در شکل ۶ نشان داده شده است. تراز مایع و سایر اندازه ها در شکل مذکور ارائه شده است. تانک بدون سقف بوده و در قسمت پایه توسط ۲۴ عدد انکر بولت M56 مهار گشته است. مشخصات انکر بولت ها از نوع ASTM A193 Gr. B7 میباشد. مینیمم مقاومت کششی فولاد ۶۲۰ MPa و مقاومت جاری شدن آن MPa ۴۸۵ مفروض بوده اند. سطح مقطع موثر انکر بولت ها  $18/63 \text{ cm}^2$  می باشد.

#### ۱.۴. مدل هازنر بر مبنای آئین نامه API

براساس مدل هازنر می توان نیروی برش زلزله ناشی از مؤلفه جرم سخت و نرم را محاسبه و در ارتفاعاتی که آئین نامه مقرر می کند وارد نمود (شکل ۷). جدول ۱ اطلاعات لازم برای محاسبه نیروی برشی ناشی از زلزله را بر اساس آئین نامه API [۱۹] ارائه می دهد. انکر بولت ها می توانند توسط المانهای صلبی که سختی محوری و خمشی آنها بسیار زیاد است به محل اثر جرم سخت متصل گردند. محل انکر بولت ها تکیه گاه ساده تعریف شده است.



شکل ۶: هندسه تانک مورد مطالعه و مشخصات ورقهای به کار رفته



شکل ۷: مدل هازنر بر مبنای آئین نامه API

جدول ۱: پارامترهای لازم برای محاسبه برش زلزله

واحد	مقادیر	
-	III	SUG: گروه لرزه ای
-	۱/۵	I: ضریب اهمیت
-	۰/۳	Z: ضریب زلزله
-	۴	Rwi: ضریب رفتار
-	۱/۱	Fa: ضریب شتاب منطقه (مؤلفه شتاب طیفی برای پریود کوتاه)
-	۰/۶۷	Q: ضریب تبدیل طیف پیشینه محتمل (MCE) به طیف طرح (DBE)
%g	۰/۴۵	S <sub>0</sub> : ضریب پیشینه زلزله متحمل براساس نقشه های لرزه خیزی برای میرایی SV، مؤلفه شتاب طیفی برای پریود صفر (شتاب پیشینه زمین برای سازه های صلب)
kN	۳۷۱	Ws: وزن پوسته تانک و ملحقات
kN	۴۵۰	Wr: وزن سقف شامل ۱۵٪ برای متعلقات و ۱۰٪ بار برف طراحی سقف
kN	۱۱۴	Wf: وزن کف تانک
kN	۱۶ ، ۵۳۰	Wi: وزن مربوط به جرم سخت $[1 - 0.218 D / H] Wp$
kN	۲۲ ، ۴۲۹	Wp: وزن کلی محتویات تانک
m	۴/۸۸	Xi: ارتفاع از کف تانک تا مرکز اثر جرم سخت (E.6.1.2.1-2)
m	۱۲/۶	H: ماکزیمم ارتفاع محتویات تانک
m	۱۵/۲	D: قطر تانک
-	۴	Rwi: ضریب کاهش نیرو برای جرم سخت با استفاده از روش تنش مجاز برای تانکهای مهار شده
-	۲	Rwc: ضریب رفتار مربوط به جرم موج با استفاده از روش تنش مجاز برای تانکهای مهار شده
S	۴	TL: پریود انتقالی وابسته به منطقه برای حرکتی با پریود بالا
-	۱/۵	Fv: ضریب شتاب منطقه براساس سرعت
-	۰/۵۸	Ks: ضریب زمان تناوب جرم موج
S	۴/۰۷۱	TC: پریود طبیعی جرم موج
-	۱/۵	K: ضریب تطبیق شتاب طیفی برای میرایی 0.5 - 5%
kN	۶ ، ۱۹۴	Wc: وزن مربوط به جرم موج $0.23 D / H \tanh(0.367H/D) Wp$
m	۸/۸۴	Xc: ارتفاع از کف تانک تا مرکز اثر جرم موج (E.6.1.2.1-2)

Ac, Ai به ترتیب ضریب زلزله مربوط به جرم سخت و جرم موج Vc, Vi به ترتیب برش پایه ناشی از جرم سخت و جرم موج و V برش پایه کل می باشند که از روابط زیر محاسبه می گردند:

$$Ai = 2.5 Q F_a S_0 (1/Rwi) = 0.31g \quad (E.4.6.1.1 - 2) \quad (1)$$

$$Vi = Ai (Ws + Wr + Wf + Wi) = 527 \text{ ton} \quad (E.6.1 - 2) \quad (2)$$

$$Ac = 2.5 k Q f_v S_0 \left( \frac{0.68}{S} \frac{T_1}{T_C^{1.2}} \right) \left( \frac{I}{Rwc} \right) = 0.21g \quad (3)$$

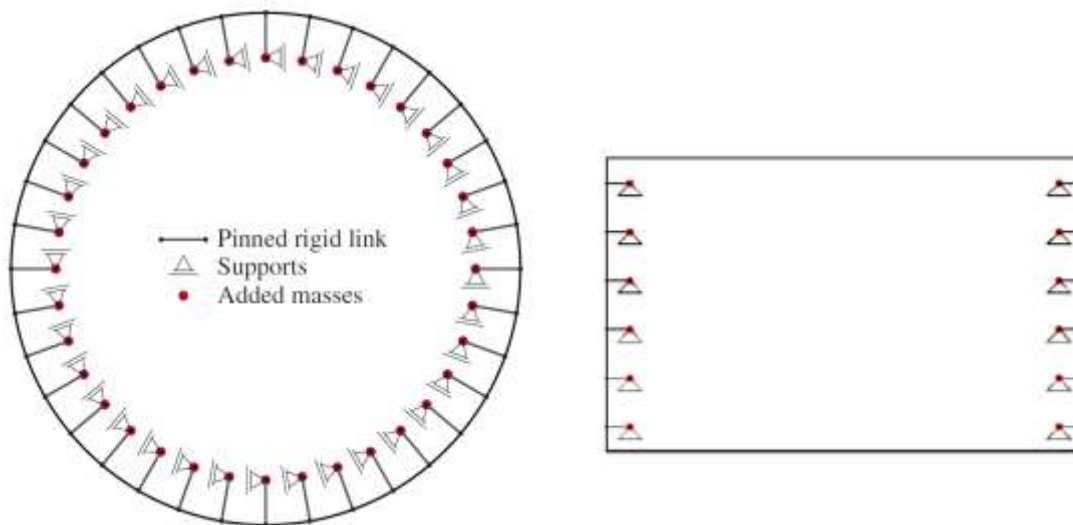


$$V_c = A_i W_c = 1,290 \text{ ton} \quad (4)$$

$$V = (V_i^2 + V_c^2)^{0.5} = 543 \text{ ton} \quad (5)$$

#### ۲.۴. مدل جرم اضافی:

نرم افزار اجزای محدود SAP 2000 Rev. 14.2.4، برای انجام کلیه تحلیلهای عددی استفاده شده است. ابعاد المانها  $m \times m \times 1/5$  می باشد. المانهای چهار گره ای برای این منظور انتخاب شده اند. از نقطه عملکردی، روش جرم اضافی، روشی است که در آن جرم پیوسته مایع از توزیع فشار آن بر جدار مخزن مشتق میگردد و همانطور که در شکل ۸ دیده می شود بوسیله رابطهای یک درجه آزادی به بدنه سازه متصل می شوند. جرمهای اضافی از فشار هیدرودینامیکی عمود بر بدنه منتج گردیده و مبنایست طوری تعریف شوند که تنها اینرسی در جهت فشار بر بدنه را دارا باشند. از اینرو، برای مدلسازی جرمها از المانهای یک درجه آزادی استفاده شده که از یک سو به جرم و از سوی دیگر به جداره تانک متصل گردیده اند. تکیه گاههایی که المانها را مقید می کنند، تنها اجازه حرکت در جهت عمود بر بدنه تانک را داشته و در جهت مماسی و قائم امکان حرکت ندارند.



شکل ۸: مدل جرم اضافی

مدل جرم اضافی تنها از توزیع فشار ناشی از جرم سخت منتج گشته و از مؤلفه جرم موج صرفنظر شده است. توزیع فشار جرم سخت از حرکت افقی آزاد تانک صلب بدست می آید و می تواند به صورت زیر بیان شود [۱۵ و ۱۴]:

$$P_i(\eta, \theta, t) = C_i(\eta) x_g^-(t) \rho R \cos(\theta) \quad (6)$$

بطوریکه،

$\eta$ : ارتفاع از کف تانک؛

$\theta$ : موقعیت در سیستم مختصات قطبی؛

t: زمان؛

$x_g^-(t)$ : شتاب زلزله؛

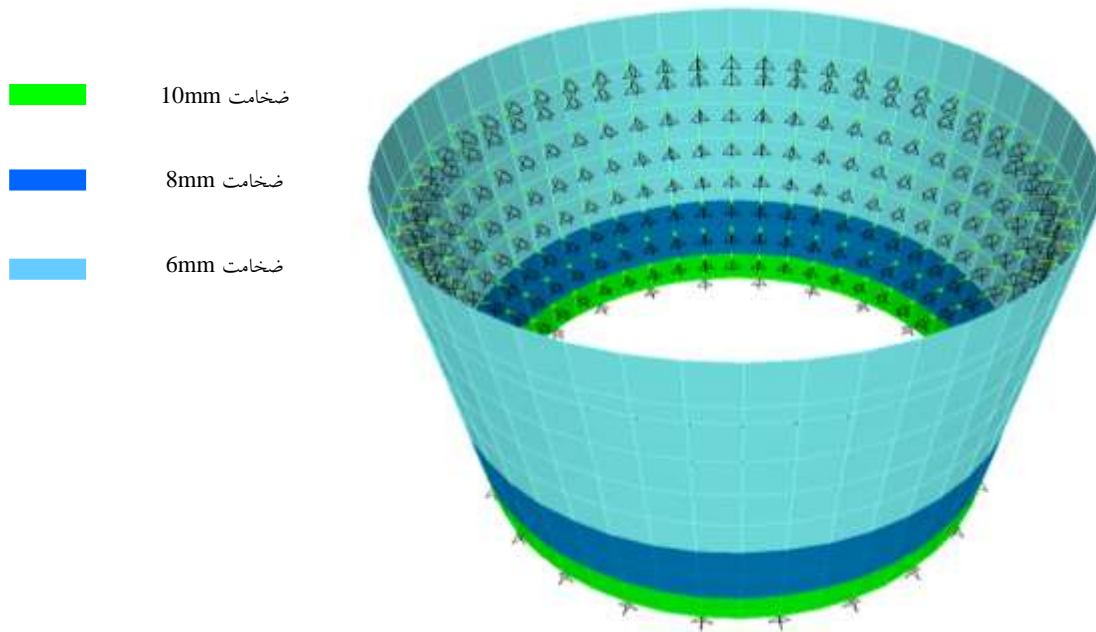
$\rho$ : چگالی مایع؛

$C_i(\eta)$ : تابع توزیع فشار در ارتفاع  $\eta$  است که از شکل ۵ قابل محاسبه می باشد.

جرم متمرکز در هر نقطه مش از حاصلضرب فشار وارد بر دیواره طبق معادله ۶ در سطح مربوط به هر نقطه و تقسیم کردن آن به شتاب مرجع  $a_n = x_g^-(t) \cos \theta$  بدست آمده است. در نتیجه در هر نقطه جرم متمرکز از معادله ۷ بدست میآید.

$$m_i = \frac{p_i E_{size}^2}{a_n} = C_i(\eta) \rho \cdot R E_{size}^2 \quad (7)$$

$E_{size}$  مبین بعدالمان سطح می باشد. به جای  $E_{size}^2$  می توان مساحت المان سطح مربوطه را جایگزین کرد که در تحقیق حاضر این مساحت  $1/5 \text{ mm}^2$  منظور گشته است. همانطور که عنوان شد، تانک در قسمت پائین توسط ۲۴ انکربولت مهار شده است که محل انکربولتها به صورت تکیه گاه ساده تعریف شده است. با توجه به نیروهای ایجاد شده در محل تکیه گاهها، انکربولتها مورد بررسی قرار گرفته اند. در شکل ۹ شیوه مدلسازی تانک مورد نظر را با روش جرم اضافی نمایش داده شده است.



شکل ۹: مدلسازی تانک مورد مطالعه بر مبنای مدل جرم اضافی

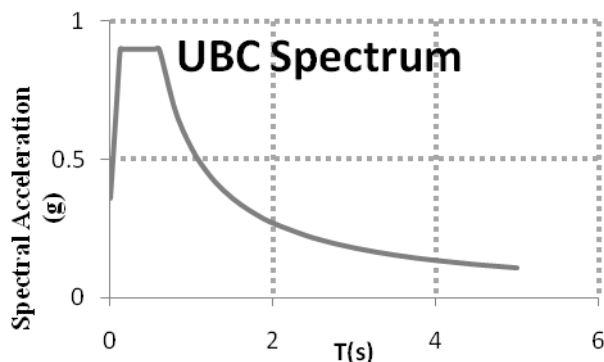
### ۳. تحلیل‌های عددی:

#### ۳,۴. آنالیز مدال :

تنشهای پسماند (Pre-Stress) ناشی از فشار هیدرواستاتیک در دیواره تانک اثر زیادی در مدهای Shell – Type دارند و خصوصا" زمان تناوب آنها را کاهش می دهد. ولی این تنشها اثر مهمی روی مدهای لرزه ای کنسولی ندارد. از آنجا که مدهای کنسولی پاسخ کلی تانکها محتوی مایعات را کنترل می کند می توان از اثر تنشهای پسماند در تعیین برش پایه و واژگونی صرفنظر کرد [۲۰].

#### ۳,۵. تحلیل دینامیکی طیفی:

در این مقاله برای بررسی نیروهای حاصل از مدلسازی با روش جرم اضافی در انکربولتها از بارگذاری دینامیکی طیفی استفاده شده است. طیف بکار گرفته شده، طیف UBC با مشخصات:  $Ca = 0.36$  ،  $Cv = 0.54$  ، ناحیه لرزه ای ۳ و نوع خاک Sd فرض شده اند. شکل ۱۰ طیف UBC مورد استفاده را نشان می دهد.



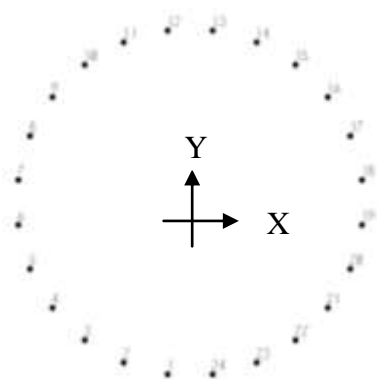
شکل ۱۰: طیف طرح بر مبنای آیین نامه UBC

پس از اعمال ضریب اهمیت ۱/۵ و ضریب رفتار ۳، برش پایه حاصل از طیف در نهایت با برش پایه استاتیکی حاصل از روش هازنر همپایه گشته است. از آنجاییکه، براساس آیین نامه API زلزله در تراز سرویس تعریف شده است برای تبدیل آن به تراز نهایی از ضریب ۱/۴ استفاده شده است.

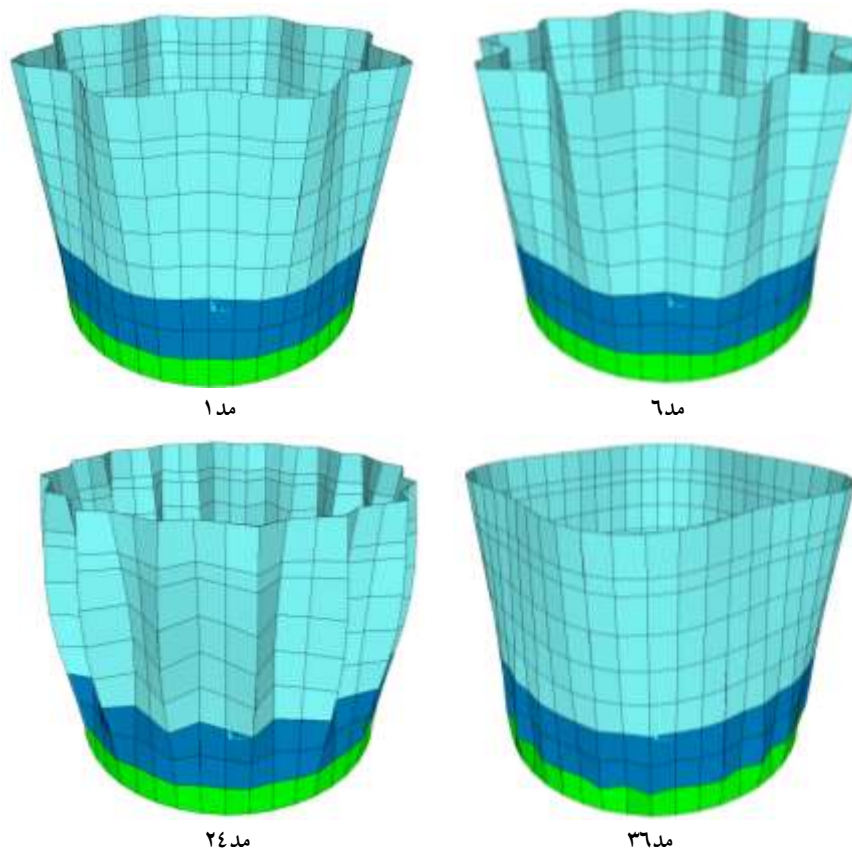
### ۴. نتایج:

در تانکهای فلزی معمولا فرض بر این است که برش وارده به تانک توسط اصطکاک بین کف تانک و سطح خاک یا بتن تحمل می گردد و انکربولتها سهمی از برش نمی برند. از اینرو در این مطالعه به طور عمده به نقش کشش در انکر بولتها پرداخته شده و از اثر برش صرفنظر گردیده است. برای آنکه بتوان نیروهای انکربولتها را به سادگی مقایسه نمود انکر بولتها شماره گذاری شده اند (شکل ۱۱). نیروی زلزله در جهت X وارد شده و نیروی کششی انکر بولتها استخراج شده است. نیروی زلزله در جهت Y نیز نتایج مشابهی در انکر بولتهای عمود بر انکربولتهای مورد مطالعه بدست می دهد. شکل ۱۲ تعدادی از تغییرشکل‌های تانک تحت تحلیل طیفی را نشان می دهد. در تحلیلها، برای مشارکت حدود ۹۹/۶٪

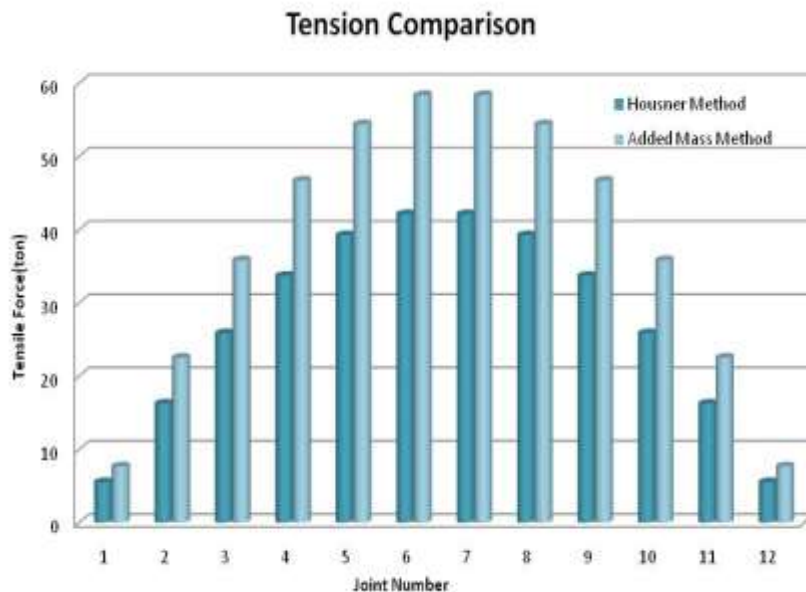
جرم ۵۰۰ مد فعال شده اند. شکل ۱۳ نیروهای کششی در انکر بولتهای را در دو روش هازنر و جرم اضافی نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود نیروی کششی در انکر بولتهای واقع در امتداد نیرو بیشترین و در انکر بولتهای عمود بر امتداد نیرو کمترین مقدار را دارد. این روند در دو روش هازنر و جرم اضافی یکسان است. مقایسه مقادیر نیرو در دو روش نشان می دهد که نیروی کششی انکر بولتهای در روش جرم اضافی تقریباً ۳۰٪ بیشتر از روش هازنر می باشد. به گونه ای که در انکر بولت شماره ۱ این اختلاف ۲ ton و در انکر بولت شماره ۶ ۱۶ ton میباشد. روشن است که این مقدار افزایش نیرو برای انکر بولتهای در امتداد نیرو بحرانی تر است.



شکل ۱۱: شماره نقاط قرار گیری انکر بولتها



شکل ۱۲: نمونه ای از تغییرشکلهای تانک تحت تحلیل طیفی



شکل ۱۳: مقایسه نیروی کششی حدی در انکر بولتها در دو روش هازنر و جرم اضافی

## ۵. نتیجه گیری:

میتوان نتیجه گیری نمود روش جرم اضافی برپایه مدل کردن سازه و مایع درون آن به صورت یک مدل اجزا محدود که در این مقاله از آن استفاده گردیده است، از آنجا که نیاز به تمهیدات ویژه ای ندارد و به سادگی در نرم افزارهای اجزاء محدود قابل پیاده سازی می باشد روش مناسبی برای مدلسازی تانکهای فلزی حاوی مایعات می باشد. این روش مدل دقیقتری برای مطالعه رفتار دینامیکی و اندرکنش مایع و سازه بویژه اثرات موضعی آن فراهم مینماید. به عبارت دیگر این روش ترکیبی از دقت و صرفه جویی می باشد و براساس نتایج گرفته شده در این مقاله نیروهای حاصله نسبت به روش های رایج مدلسازی در جهت اطمینان بیشتری قرار دارد. بطوریکه، نتایج نشان می دهند که تحلیل دینامیکی با روش جرم اضافی نیروهای بزرگتری نسبت به روش مدل هازنر در میل مهارها ایجاد می کند، و اختلاف بین نیروهای حدی برآورد شده در دو روش برای نمونه تانک فلزی مطالعه شده به ۳۰٪ نیز رسیده است، که میتواند در طراحی و یا کنترل میل مهارهای تانکهای فلزی حاوی مایعات در مناطق لرزه خیز قابل ملاحظه باشد.

## مراجع

- [1] Hamdan FH. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *“Journal of Constructional Steel Research”* 2000; 53(3):307–333.
- [2] Veletsos AS, Shivakumar P. *“Dynamic response of tanks containing liquids or solids”*, in Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures DE Beskos and SA Anagnostopoulos, Editors, Computational Mechanics, Inc. 1997.
- [3] Rammerstorfer FG, Scharf K, Fisher FD. *“Storage Tanks Under Earthquake Loading”*. Applied Mechanics Reviews 1990; 43(11):261–282.

- [4] Brown KJ, et al., “*Seismic performance of Los Angeles water tanks*”, in Fourth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, MJ O’Rourke, Editor : San Francisco. 1995, 668–675.
- [5] Haroun MA.” *Behaviour of unanchored oil storage tanks*”: imperial valley earthquake. Journal of Technical Topics in Civil Engineering 1983; 109(1):23–40.
- [6] O’Rourke MJ, So P. “*Seismic fragility curves for on-grade steel tanks*”. Earthquake Spectra 2000;16(4):801–815.
- [7] Salzano E, Iervolino I, Fabbrocino E. “*Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk Analysis*”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2003; 16(5):403–409.
- [8] ACI.318 Building Code Requirements for Structural Concrete, 2011
- [9] Westergaard HM. “*Water pressures on dams during earthquakes*”. Transactions of the American Society of Civil Engineers 1933; 98:418–433.
- [10] Lee GC, Tsai CS. “*Time-domain analyses of dam-reservoir system*”. I exact solution. Journal of Engineering Mechanics 1991; 117(9):1990–2006.
- [11] Tsai CS, Lee GC. “*Time-domain analyses of dam-reservoir system*”. II substructure method. Journal of Engineering Mechanics 1991; 117(9):2007–2026.
- [12] De Angelis M, Giannini R, Paolacci F. “*Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests*”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2010; 39(4):377–396.
- [13] Shrimali MK, Jangid RS. “*Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings*”. Engineering Structures 2002; 24(7):909–921.
- [14] Virella JC, LE Suarez, Godoy LA. “*Effect of pre-stress states on the impulsive modes of vibration of cylindrical tank liquid systems under horizontal motions*”. Journal of Vibration and Control 2005; 11(9):1195–1220.
- [15] Virella JC, Godoy LA, Suárez LE. “*Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake Excitation*”. Journal of Constructional Steel Research 2006; 62:521–531.
- [16] Virella JC, Godoy LA, Suárez LE. “*Fundamental modes of tank-liquid systems under horizontal motions*”. Engineering Structures 2006; 28: 1450–1461.
- [17] Haroun MA, Housner GW. “*Earthquake response of deformable liquid storage tanks*”. Journal of Applied Mechanics 1981; 48(2):411–417.
- [18] Veletsos, AS, Yang JY. “*Earthquake response of liquid storage tanks*”, in Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics - Second Annual Engineering Mechanics Division Specialty Conference, ASCE: North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, U.S.A. 1977; 1–24.
- [19] API. Welded Tanks for Oil Storage, 2008.
- [20] Buratti, N, Tavano, M. “*Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method*”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2014; 43:1–21.