اثر حضور عامل خورنده بر رشد ترک خستگی در رایزرهای آب عمیق

امیر مقیسه[۱*]، عباس رهی[۲]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، شرکت نفت فلات قاره ایران؛ amirmoghiseh@gmail.com
[۲]استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی؛ abbasrahi@pwut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
رایزر
ترک اولیه
شکست خوردگی
آب دریا
نفت ترش

چکیده

در این تحقیق به مطالعه عمر شکست خوردگی رایزر پرداخته خواهد شد. به این منظور ابتدا نیروهای وارد بر رایزر بررسی شده و مدلی از رایزر که شامل تمام عوامل تحریک آن باشد به دست خواهد آمد. برای برآورد نیروهای هیدرولیکی وارد بر رایزر از تئوری امواج دامنه کوتاه و رابطه اصلاح شده موریسون استفاده خواهد شد. سپس روابط حاکم بر تعادل دینامیکی رایزر استخراج گردیده و با توجه به نوسان رایزر در اثر نیروهای وارده، توزیع ممان خمشی و نیز اثرات وزن و حضور سکو در سطح دریا به دست می‌آید و تاریخچه بارگذاری در هر مقطع با استفاده از برآیند تنش‌های خمشی و محوری محاسبه می‌گردد. از آنجا که رایزرها در معرض دو محیط خورنده آب دریا و نیز نفت حاوی سولفید هیدروژن (نفت ترش) قرار دارند، حضور یک ترک اولیه می تواند اثرات مخربی داشته باشد و وقوع شکست خوردگی محتمل خواهد بود. به این منظور با در نظر گرفتن یک ترک اولیه، عمر شکست در طول رایزر و در حضور سیال خورنده تخمین زده می شود. در نهایت اثر حضور عامل خورنده آب دریا و نیز سولفید هیدروژن بر رشد ترک و در نهایت عمر شکست رایزر مطالعه خواهد گردید. به منظور حل معادلات حاکم بر تعادل دینامیکی رایزر از روش‌های عددی رانج کاتا و تفاضل محدود استفاده خواهد شد.

Effect of Corrosive Environment on Fatigue Crack Propagation in Deep Water Riser

Amir Moghiseh[1*], Abbas Rahi[2]

[1]M.S in Mechanical Engineering, Iranian Offshore Oil Company; amirmoghiseh@gmail.com
[2]Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering Abbaspour College of Technology Shahid Beheshti University; abbasrahi@pwut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 10 Feb. 2013
Accepted: 11 Mar. 2014
Available online: 19 Mar. 2014

Keywords:
Riser
initial crack
corrosion fracture
seawater
crude oil

ABSTRACT

The corrosion fracture life of marine riser is investigated. Riser will be modeled as a long beam and the wave and current forces is estimated by short wave theory and modified Morison's equation. Dynamic equilibrium equations of riser will be obtained on based of Euler theory. After bending stress calculation along the riser that includes effect of riser weight and platform motion, loading history can be obtained in riser cross section. Since risers exposed to seawater and sour crude oil, an initial crack can have destructive effects and corrosion fracture can be occurred. So effect of initial crack in riser cross sections in different depths and at present of corrosive fluid is studied. At the end the effect of seawater and crude oil on crack propagation and corrosion fracture life is investigated. In order to solve riser dynamic equilibrium equation Range-Kutta and finite difference methods will be used.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

۱- مقدمه

رایزر یک تیر لوله‌ای شکل برای اتصال بین تجهیزات بستر و شناور در سطح دریا می‌باشد. طول رایزر گاه به چند هزار متر می‌رسد که از قطعات لوله با قطر و طول مشخص تشکیل شده است. یک متخصص در رشته‌های فنی به خوبی می‌داند که تیری با دهانه آزاد به این بزرگی چه نیروهای عظیمی را تحمل می‌کند و از جانب دیگر نوسانات سکوی شناور مستقر در سطح آب، اثرات شلاقی سنگین بر رایزر وارد می‌نماید که گاه تا چند برابر نیروهای استاتیکی و ثقلی رایزر می‌رسند. هدف از استفاده رایزر فراساحل تهیه و فراهم نمودن امکان انتقال سیالات و اجزاء حفاری بین سکو و چاه بوده و ممکن است به‌صورت رایزر تولید یا رایزر حفاری که هر کدام به دو شکل ثابت و انعطاف‌پذیر تقسیم می‌گردند، مورد استفاده قرار گیرند. به‌طور کلی عضو عمودی بلند یک سازه فراساحل در اعماق زیاد، تحت تغییر شکل و تغییر مکان بر اثر وزن خود، حرکت سازه شناور، امواج و جریان قرار دارد.

رایزرها در سطح به یک سازه سطحی و در کف به یک سیستم کنترل و حفاظت چاه متصل هستند. سازه‌های دریایی که تا امروز شناخته شده‌اند، اغلب اعضای لوله‌ای دارند. این اعضا نیروهای اعمالی را توسط سختی‌های محوری، برش و خمشی خود تحمل می‌کنند. در بسیاری از موارد نیروی شناوری برای ایجاد پایداری کلی سازه یا کاهش بارهای وارد بر اعضاء استفاده می‌شود.

ویلیامسون و گواردهان [۱]، سارپکایا [۲] وگابای و بناروبا [۳] نشان دادند که گردابه‌های تشکیل شده در اثر عبور جریان از روی یک سیلندر که فرکانس آن با استفاده از قانون استروهال تعریف می شود، نیروهای لیفت متناوبی را ایجاد می‌کند که به سیلندر وارد شده و در صورتی که سیلندر به میزان کافی انعطاف‌پذیر باشد می‌تواند آن را تحمل نماید. یان کیو، جنگ و لو [۴] رایزر را به‌صورت یک مدل با تکیه‌گاه‌های ساده فرض نمودند و ارتعاش ایجاد شده توسط جریان گردابه‌ای را بدون ساده‌سازی ترم غیرخطی معادله مورسیون مطالعه نمودند. در سال ۲۰۰۰ چی ویان کیو وزی مین [۵] یک مدل با انتهای یک سرگیردار و ابتدای قابل حرکت برای یافتن پاسخ دینامیکی رایزر پیشنهاد نمودند. کنگ، زنگ و یونگ [۶] رفتار دینامیکی رایزر را در حضور نیروی لیفت ناشی از جریان گردابه‌ای در سال ۲۰۰۶ بررسی نمودند. همچنین مطالعات تجربی زیادی برای بررسی حرکت جانبی رایزرهای دریایی صورت گرفته است که از آن میان می‌توان به ویکیستاد و هالس [۷] اشاره نمود. ویلدن و گراهام [۸] ارتعاش القا شده به رایزر در اثر ایجاد جریان گردابه‌ای ناشی از جریان یکنواخت را مورد تحقیق قرار دادند. سوزوکی و تاکانو، اینوموتو، اکا [۹] آزمایشی را بر روی یک سیلندر ۱۱ متری از جنس تفلون که در انتهای فوقانی خود در معرض یک تحریک قرار داشت انجام دادند. کویپر، براگمنز و متریکین [۱۰] با ارائه یک مدل از رایزر که در انتهای خود یک اتصال از نوع پین و در انتهای فوقانی متصل به یک سکوی شناور و طبعاً تحریک نوسانی ناشی از حرکت سکو روی امواج بود به بررسی رفتار دینامیکی رایزر بدون در نظر گرفتن نیروهای ناشی از میدان موج و پروفیل جریان پرداختند. آنها با نادیده انگاشتن حرکت افقی فوقانی رایزر به بررسی پایداری استاتیکی و دینامیکی رایزر با استفاده از تئوری فلوکت مبادرت نمودند. بارهولم و همکارانش [۱۱] به ارائه یک آزمایش جهت تخمین عمر خستگی رایزرهای دریایی در حضور نیروهای وارد بر رایزر در جهت جریان و در راستای عمود بر آن پرداختند.

ابارا [۱۲] به مطالعه وقوع خستگی خوردگی با استفاده از مطالعه سطح شکست سازه ها پرداخت. وی و همکارانش در سال ۱۹۹۳[۱۳] به مطالعه اثر حضور نفت ترش بر رشد ترک خوردگی و وقوع شکست در فولادها پرداختند. مادکس [۱۴] به بررسی مطالعات و آزمایشات صورت گرفته به منظور تبیین رفتار ترک خوردگی فولاد X65 در محیط نفت ترش و آب دریا پرداخت و اثر مشخصات بارگذاری از جمله فرکانس و یا نسبت بار را مورد مطالعه قرار داد.

رایزرها طوری طراحی می‌گردند که زمان نصب انها در دریا حداقل باشد و گره‌ها تحمل بارهای کششی زیاد را داشته باشند. برای کاهش اثرات خمشی، همواره می‌بایست نیروی کششی بزرگی توسط شناور بر رایزر وارد شود تا از انحنای رایزر بکاهد. این کشش نیز سهم بزرگی از نیروهای داخلی رایزر را به خود اختصاص می‌دهد. کشش فوقانی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تنش‌های خمشی بزرگ در قسمت پایین رایزر، که کمترین کشش و در قسمت بالا که بیشترین مقدار نیروی موج موجود است، رخ ندهد. عموماً کم بودن اندازه لوله و ظرفیت کششی طرح‌ها و زیاد بودن نیروی شناوری اضافی عواملی هستند که نیاز به کاهش کشش بالایی را باعث می‌شوند. خیلی مهم است که رایزر همیشه به حالت کشش (تا حد ممکن ثابت) نگاه داشته شود تا از اعمال صدمات به اتصال‌ها و خود لوله جلوگیری شود. کشش مطلوب می‌تواند توسط تجهیزات کششی تأمین شود که از یک سیستم پنوماتیکی، کمپرسور که فشار پیستون‌های پنوماتیکی را تأمین می‌کند و کابل‌های کششی تشکیل شده است. یکی از معایب استفاده از سیستم کششی آن است که قسمت‌های بالایی رایزر تحت اثر نیروهای زیاد غیر متناسب قرار می‌گیرند به همین دلیل سعی بر این است که شناوری بیشتری تأمین گردد. این کار توسط بسته‌های فوم یا قوطی‌های متصل به رایزر انجام می‌گیرد که در نقاط مشخصی به رایزر متصل هستند. در محل اتصال رایزر به دهانه چاه در بستر دریا مفصل کروی برای حذف ممان خمشی وجود دارد و باعث چرخش‌هایی سازگار با حرکت شناور و خیزهای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

سازگار با بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌شود. مفصل کروی بالا ممان‌های خمشی بیش از اندازه که به علت واکنش‌های رایزر، چرخش و پیچش ناشی از حرکت شناور می‌باشد را حذف می‌کند. رایزر عملیات خود را می‌بایست در حین حرکت سکو و اعمال نیروهای جریان و موج بر آن انجام دهد. شرایط نیروهای باد، موج و جریان می‌بایست تبدیل به پیشگویی‌هایی درباره حرکت سکو گردد. این امر می‌تواند با تخمین‌هایی برای سکو تحقق یابد. طراح سیستم رایزر فراساحل می‌بایست حداکثر تنش خمشی دینامیکی را در رایزر محاسبه نماید. همچنین در مواردی باید حداکثر شیب رایزر در موقعیت اتصال به BOP یا مفصل کروی و نیز شکست ناشی از خستگی را که به دلیل تنش‌های نوسانی رخ می‌دهد در نظر قرار بدهد.

جهت ارائه یک طراحی ایمن و قابل اعتماد، ارائه یک بارگذاری محیطی واقع‌بینانه بر روی رایزر دریایی ضرورت دارد. عوامل اساسی که در این مورد می‌بایست در نظر قرار گیرند عبارتند از:

۱- نیروهای موج با در نظر گرفتن جدی‌ترین و خطرناک‌ترین حالات دریایی ممکن

۲- عمق آب

۳- تغییر مکان و جابجایی استاتیکی سکو بر اثر باد، موج و جریان دریایی

۴- نیروهای ناشی از جریان روی رایزر

۵- مشخصه‌های حرکات افقی سکو

وجود یک ترک در رایزر ممکن است آن را تضعیف کند، بدین ترتیب رایزر به واسطه شکسته شدن به دو یا چند تکه تخریب می‌گردد. این امر می تواند در تنش‌های کمتر از استحکام تسلیم رخ دهد، جایی که معمولاً واماندگی مورد انتظار نیست. علاوه بر ترک ها انواع دیگر عیوب وجود دارند که شبیه به ترک هستند و می‌توانند به آسانی به ترک‌ها تعمیم داده شوند و آن‌ها نیز باید به عنوان ترک تلقی شوند. تعمیراتی که باید به دلیل وجود ترک‌ها در رایزر انجام شوند ممکن است توسط جایگزینی یا اصلاح آن، مثلاً با سنگ‌زنی کنار یک ترک کوچک برای هموار شدن سطح یا به وسیله تقویت ناحیه ترک‌دار به شیوه‌ای مشابه، انجام شوند. آن چه در این میان از اهمیت بالایی برخوردار است اثر وجود یک ترک خستگی بر کاهش استحکام رایزر به دلیل وقوع شکست ترد است. در عین حال وجود ترک با اندازه‌ای بحرانی در ماده به کار رفته در ساخت رایزر، محتمل بوده و ممکن است باعث خرابی آن گردد. یک وضعیت رایج تر این است که یک عیب کوچک در ابتدا ممکن است به یک ترک تبدیل شده و سپس تا رسیدن به یک اندازه بحرانی برای شکست ترد رشد کند. در عین حال، در صورت وجود یک محیط شیمیایی خورنده مانند نفت ترش یا آب دریا، حتی یک بار ثابت می تواند منجر به رشد ترک محیطی گردد. در صورتی که بارهای متناوب در حضور یک محیط شیمیایی اعمال گردند یا مخصوصاً چرخه بارگذاری کند بوده و یا پریودهایی از بارهای ثابت بر چرخه بارگذاری سوار شوند، هر دو نوع رشد ترک ممکن است رخ دهد.

در ادامه با استفاده از نیروهای وارد بر رایزر به تعیین رابطه حاکم بر رفتار دینامیکی رایزر مورد استفاده در یک سکوی نیمه شناور پرداخته خواهد شد و تاریخچه بارگذاری در هر مقطع به‌دست خواهد آمد. در نهایت با استفاده از روابط حاکم بر رشد ترک و وقوع شکست، عمر رایزر و اثر حضور سیال خورنده بر آن مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۲ - مدل‌سازی و استخراج معادلات

رایزرهای دریایی عموماً در معرض جریان افقی دریا، امواج، جابجایی افقی سکو و حرکت پریودیک آن در راستای عمود بر سطح دریا قرار دارند. به منظور استخراج معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی رایزر از تئوری اولر برنولی استفاده می‌گردد [۱۵].

سکوها در انتهای فوقانی خود به دلیل حضور موج و نیز نیروی باد دارای حرکت افقی می‌باشند اما فرکانس این حرکت در مقایسه با فرکانس حرکت رایزر بسیار کمتر است و بدین جهت این حرکت افقی تنها به‌صورت یک جابجایی افقی عمل می‌کند. به منظور مطالعه رفتار رایزر، حرکت قائم سکو به‌صورت پریودیک رابطه (۱) فرض می‌شود:

$$\eta = a.Cos(K_w.w - \sigma_w t) \qquad (۱)$$

که در این رابطه a دامنه امواج، K_w عدد موج، w جابجایی در راستای جریان، σ_w فرکانس امواج و t زمان است. بر این اساس و با استفاده از تئوری امواج دامنه کوتاه و رابطه موریسون اصلاح شده[۱۶]، رابطه حاکم بر رفتار دینامیکی رایزر در جهت جریان و عمود بر آن به صورت معادلات (۲) و (۳) ارائه می گردد.

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + W_B\frac{\partial w}{\partial z} - T_e.\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + m_t.\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F_D \qquad (۲)$$

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + W_B\frac{\partial y}{\partial z} - T_e.\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + (m_t).\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F_L \qquad (۳)$$

که در این رابطه W_B وزن شناوری در واحد طول، EI سختی خمشی، T_e کشش مؤثر در رایزر، m_t جرم کل در واحد طول، F_D برآیند نیروهای وارد بر رایزر در راستای جریان و F_L برآیند نیروهای وارد بر رایزر در راستای عمود بر جریان می‌باشند که به صورت زیر تعریف می شوند:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

$$F_D = \frac{1}{2} C_D.\rho.A.$$
$$[a_w.\sigma_w.\frac{Cosh\ K_w(h-z)}{Sinh\ (K_w h)}.Cos\left(K_w.w-\sigma_w t\right)$$
$$+V_t + V_w(1-z/h) - \frac{\partial w}{\partial t}].$$
$$\left|a_w.\sigma_w.\frac{Cosh\ K_w(h-z)}{Sinh\ (K_w h)}.Cos\left(K_w.w-\sigma_w t\right)+\right.$$
$$\left.V_t + V_w(1-z/h) - \frac{\partial w}{\partial t}\right|$$
$$+C_M.\rho.V.a_w.\sigma_w^{\ 2}.$$
$$\frac{Cosh\ K_w(h-z)}{Sinh\ (K_w h)} Sin\ (K_w w-\sigma_w t) \qquad (۴)$$

$$F_L = \frac{1}{2}\rho.D.C_L.$$
$$\left(a_w.\sigma_w.\frac{Cosh\,K_w(h-z)}{Sinh\,(K_w h)}.Cos\left(K_w.w-\sigma_w t\right)\right.$$
$$\left.+V_t + V_w(1-z/h) - \frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 \qquad (۵)$$
$$.Cos(\omega_S t) - \frac{1}{2}C_D.\rho.A.(\frac{\partial y}{\partial t})\left|\frac{\partial y}{\partial t}\right|$$

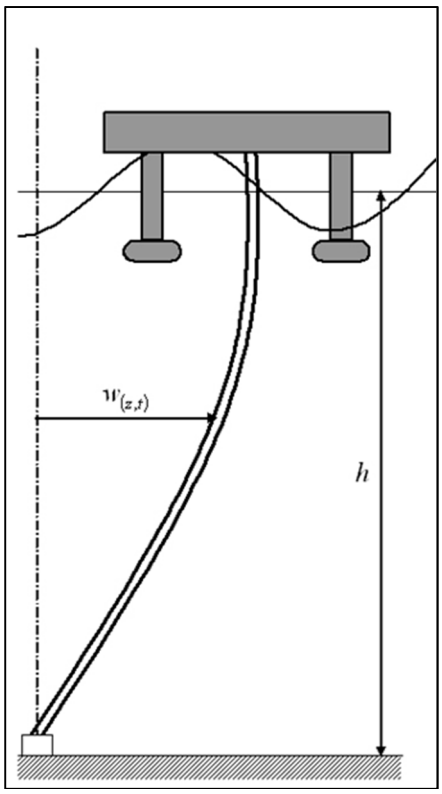
در این روابط C_D ضریب درگ، ρ دانسیته آب دریا، A سطح مؤثر رایزر در واحد طول، h عمق آب، V_t ترم جریان یکنواخت، V_w سرعت در سطح دریا، C_M ضریب جرم افزوده شده، V حجم واحد طول رایزر، C_L ضریب نیروی لیفت و ω_s فرکانس تولید گردابه است.

همان‌طور که اشاره شد به منظور تعدیل اثر حرکت سکو بر رفتار رایزر، در محل اتصال سیستم رایزری به سکو از یک سیستم جبرانساز پنوماتیکی استفاده می‌گردد. در این مقاله این سیستم به‌صورت یک فنر مدل شده و در معادلات وارد می شود. بر این اساس نیروی کششی مؤثر وارد بر رایزر را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$T_{e(z,t)} = W_B.\left(-z+fl\right)+k.\Delta \qquad (۶)$$

در این رابطه k ضریب سختی جبرانساز و Δ جابجایی جبرانساز در اثر حرکت سکو می‌باشد. ضریب f نیز مبین کشش ثابتی است که به منظور جلوگیری از کمانش رایزر در مناطق نزدیک بستر دریا به کار برده می‌شود و به عنوان ضریبی از وزن شناوری رایزر تعریف می‌شود. این ضریب معمولاً در کاربردهای فراساحل برابر ۱/۳ لحاظ می‌گردد.

شکل ۱ مدل استفاده شده در استخراج معادلات را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- مدل رایزر

در این مطالعه حل معادلات حاکم بر حرکت رایزر با استفاده از روش‌های عددی تفاضل محدود و رانج کاتا مرتبه چهارم صورت پذیرفت و بر این اساس جابجایی رایزر در هر عمق و در هر دو راستا تعیین گردید. بدین منظور فرض شد که رایزر از وضعیت اولیه خود و از حالت سکون آغاز به حرکت خواهد نمود. روابط (۷) و (۸) شرایط مرزی حاکم بر تعادل دینامیکی رایزر را در دو راستای جریان و عمود بر آن نمایش می دهد.

$$Upper\begin{cases} w_{(0,t)} = w_0 \\ EI\dfrac{\partial^2 w}{\partial z^2}_{(0,t)} = 0 \end{cases} \quad Bottom\begin{cases} w_{(l,t)} = 0 \\ EI\dfrac{\partial^2 w}{\partial z^2}_{(l,t)} = 0 \end{cases} \qquad (۷)$$

$$Upper\begin{cases} y_{(0,t)} = 0 \\ EI\dfrac{\partial^2 y}{\partial z^2}_{(0,t)} = 0 \end{cases} \quad Bottom\begin{cases} y_{(l,t)} = 0 \\ EI\dfrac{\partial^2 y}{\partial z^2}_{(l,t)} = 0 \end{cases} \qquad (۸)$$

با استفاده از نتایج حل دینامیکی، خمش رایزر در هر عمق با استفاده از رابطه زیر به‌دست خواهد آمد.

$$\sigma_{z(\theta,t)} = \frac{D}{2I_{ww}}.Sin(\theta).M_{w(t)} + \frac{D}{2I_{yy}}.Cos(\theta).M_{y(t)} \qquad (۹)$$

که در این رابطه D قطر خارجی رایزر، d قطر داخلی رایزر، θ زاویه در سطح مقطع نسبت به محور خمش، I_{ww} گشتاور دوم سطح حول محور w، I_{yy} گشتاور دوم سطح حول محور y و $M_{y(t)}$ ممان خمشی ناشی از ارتعاش رایزر در جهت جریان و $M_{w(t)}$ ممان خمشی ناشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

از ارتعاش در جهت عمود بر جریان آب بوده که به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند:

$$M_{y(t)} = E.I_{ww}.\frac{d^2w}{dz^2}$$
$$M_{w(t)} = E.I_{yy}.\frac{d^2y}{dz^2} \qquad (۱۰)$$

نیروی کششی در مقطع رایزر نیز ایجاد یک تنش کششی وابسته به زمان می‌نماید که می‌توان رابطه آن را به‌صورت زیر در نظر گرفت:

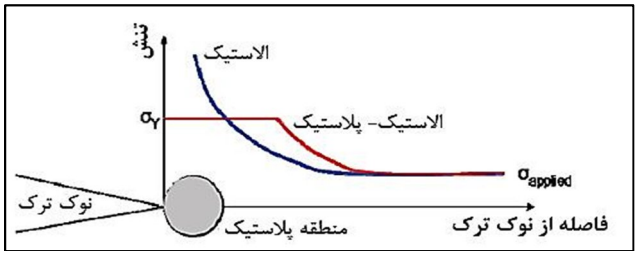
$$\sigma_{z(t)} = \frac{T_{e(z,t)}}{\pi/4\left(D^2 - d^2\right)} \qquad (۱۱)$$

تحلیل مهندسی رشد ترک اغلب لازم است و می تواند با استفاده از مفهوم شدت تنش K و مکانیک شکست انجام شود. K شدت ترکیب طول ترک، بارگذاری و هندسه موجود را تعیین می کند و به صورت زیر بیان می شود[۱۷]:

$$K = F\sigma\sqrt{\pi\, a_{Crack}} \qquad (۱۲)$$

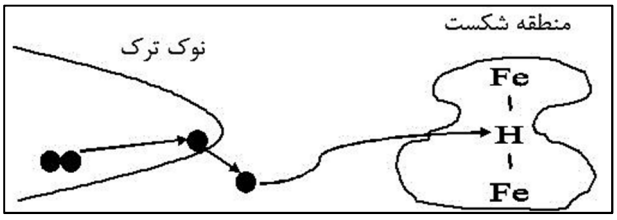
$$F = 0.265(1-\alpha)^4 + \frac{0.857 + 0.265.\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} \qquad (۱۳)$$

که a_{crack} طول ترک و σ تنش اسمی است که معمولاً بر اساس سطح مقطع ناخالص رایزر حاوی ترک تعریف می‌شود و F تابع بدون بعد هندسه است و α نسبت طول ترک به ضخامت دیواره رایزر را بیان می کند. مقدار F تحت تأثیر طول نسبی ترک می‌باشد. نرخ رشد ترک خستگی به وسیله K کنترل می‌شود. از این رو تحت بارگذاری متناوب دامنه ثابت، وابستگی K روی F و a_{crack} باعث شتاب بخشیدن ترک‌ها و در نتیجه رشد آن‌ها می‌شود. نرخ رشد ترک با تعداد سیکل‌ها می‌تواند توسط da/dN توصیف شود. نرخ رشد ترک خستگی، شیب در نقطه‌ای روی منحنی a_{crack} بر حسب N می‌باشد. اگر بارگذاری اعمال شده در مقطع رایزر با مقادیر ثابت به‌صورت متناوب باشد، تنش‌های اسمی سطح مقطع ناخالص متناظر σ_{max} و σ_{min} نیز ثابت هستند. شکل ۲ توزیع تنش در نوک یک ترک را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تمرکز تنش در نوک ترک موجب افزایش چندین برابری سطح تنش در این منطقه می‌گردد به گونه‌ای که تنش ایجاد شده می‌تواند از حد تسلیم گذشته و یک منطقه کاملاً پلاستیک به وجود آورد. قابل پیش‌بینی است که وجود منطقه پلاستیک موجب کاهش شدت تنش در این منطقه می‌گردد و با فاصله گرفتن از نوک ترک سطح تنش کاهش خواهد یافت. هر عاملی که منجر به کاهش منطقه پلاستیک گردد، افزایش نرخ رشد ترک را به دنبال خواهد داشت. یکی از این عوامل نفوذ اتم‌های کوچک به درون منطقه مجاور نوک ترک می‌باشد. اتم‌هایی مانند هیدروژن با قرار گرفتن در ساختار اتمی فلز پایه به عنوان مانعی جدی در مقابل لغزش صفحات اتمی عمل می‌کنند و از این طریق میدان پلاستیک ایجاد شده را به شدت محدود می‌کنند. با کاهش شعاع پلاستیک نوک ترک میزان افزایش طول ترک و وقوع گسیختگی در شبکه اتمی افزایش خواهد یافت.



شکل ۲- توزیع تنش در نوک ترک[۱۷]

در رایزرها حضور نفت ترش و ماده خورنده سولفید هیدروژن عاملی برای تولید هیدروژن اتمی و نفوذ آن به دیواره رایزر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است سولفید هیدروژن در مجاورت نوک ترک تجزیه شده و هیدروژن اتمی تولید می‌نماید. هیدروژن تولید شده با نفوذ به نوک ترک موجب کاهش تغییر شکل پلاستیک می‌گردد که به اصطلاح تردی هیدروژنی نامیده می‌شود. حال وجود تنش متناوب در نوک ترد ترک، رشد سریعتر ترک را نسبت به زمانی که میدان پلاستیک قابل توجه وجود خواهد داشت به دنبال دارد.



شکل۳- وقوع تردی هیدروژنی در نوک ترک

بر این اساس فرآیند تردی هیدروژنی به سه عامل مهم بستگی دارد:

۱. موقعیت اولیه و شکل هیدروژن

۲. واکنش‌های انتقالی درگیر برای حرکت هیدروژن از منبع هیدروژن به محل‌هایی که برای تردی فلز واکنش انجام می‌شود و

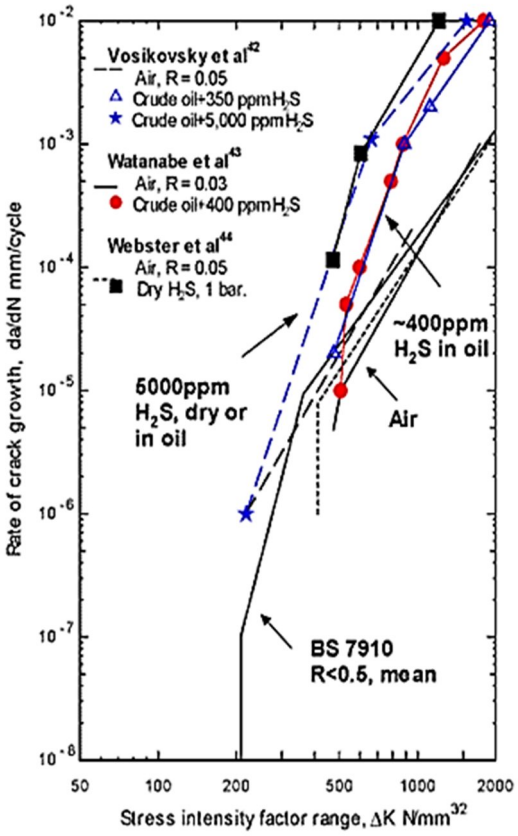
۳. مکانیسم تردی.

در صورت مشخص بودن تابع رشد ترک در حضور عامل خورنده da/dN، می‌توان عمر رشد ترک تا ضخامت لوله را به عنوان عمر شکست در رایزر به‌دست آورد.

شکل ۴ نتایج حاصل از آزمایشات چندین محقق را که رفتار فولاد $X65$ را در معرض بارگذاری متناوب و حضور سیال خورنده مطالعه نمودند نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]



شکل ۴- نتایج مربوط به رشد ترک خستگی فولاد X65در محیط نفت ترش [۱۸]

با استفاده از اطلاعات این نمودار روابط مورد استفاده در تخمین عمر رایزر تا وقوع شکست خوردگی در محیط نفت ترش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصله به صورت زیر مورد استفاده قرار خواهند گرفت[۱۸].

$$\Delta K < 20MPa\sqrt{m} \rightarrow \frac{da}{dN} = 4.8271\times10^{-12}(\Delta K)^{6.3903} \quad (۷)$$

$$\Delta K > 20MPa\sqrt{m} \rightarrow \frac{da}{dN} = 1.3928\times10^{-7}(\Delta K)^{2.9441} \quad (۸)$$

به منظور مطالعه عمر شکست رایزر در آب دریا نیز از نتایج مطالعات انجام شده به صورت روابط زیر استفاده گردیده است:

$$\Delta K < 14.96MPa\sqrt{m} \rightarrow \frac{da}{dN} = 2.955\times10^{-11}(\Delta K)^{5.7061} \quad (۹)$$

$$\Delta K > 14.96MPa\sqrt{m} \rightarrow \frac{da}{dN} = 1.8295\times10^{-7}(\Delta K)^{2.4791} \quad (۱۰)$$

همچنین برای مطالعه وقوع و رشد ترک در هوا از رابطه زیر استفاده گردیده است.

$$\frac{da}{dN} = 9.0481\times10^{-9}(\Delta K)^{2.8510} \quad (۱۱)$$

انتگرال گیری عددی از روابط فوق با استفاده از روش سیمپسون از طول اولیه ترک تا ضخامت دیواره رایزر، عمر شکست رایزر را در هر وضعیت به دست می دهد. به منظور استخراج نتایج از داده‌های جداول ۱ و ۲ استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات محیطی

مشخصه	مقدار
ضریب درگ	۰/۸
ضریب اینرسی	۱/۸
جرم افزوده شده	۰/۸
ضریب لیفت	۰/۵
فرکانس امواج$[rad/s]$	۰/۱۰۶
فرکانس تولید گردابه$[rad/s]$	۰/۱۷
چگالی گل حفاری$[Kg/m^3]$	۲۱۷۵
چگالی آب دریا$[Kg/m^3]$	۱۰۲۵
عدد موج	۰/۰۲۱
دامنه امواج$[m]$	۴/۵
مؤلفهیکنواخت سرعت$[m/s]$	۰/۱
سرعت در سطح دریا$[m/s]$	۰/۸۴
عمق دریا$[m]$	۸۰۰

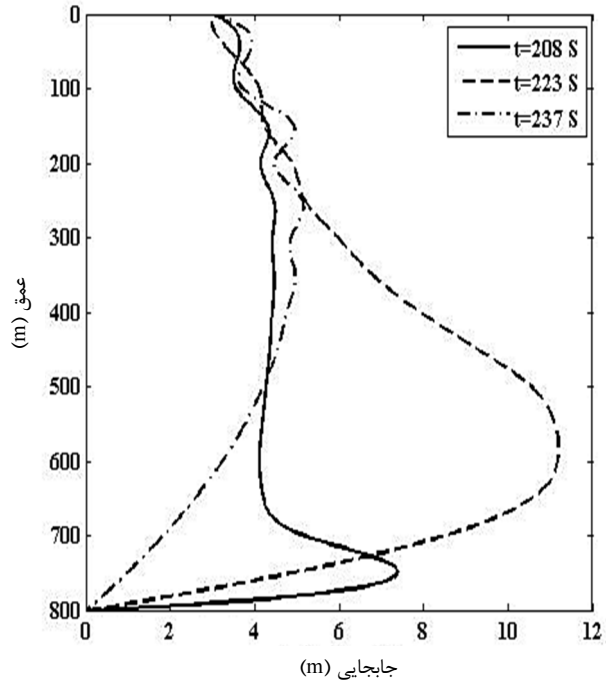
جدول ۲- مشخصات مکانیکی رایزر

مشخصه	مقدار
ضریب شدت تنش بحرانی	$K_c = 90MPa\sqrt{m}$
طول	$l = 800m$
قطر خارجی	$D = 0.53$ m
قطر داخلی	$d = 0.48$ m
چگالی	$\rho_s = 7850\ Kg/m^3$
مدول الاستیسیته	$E = 200GPa$
استحکام نهایی	$S_{ult} = 605MPa$
استحکام تسلیم	$S_y = 504MPa$

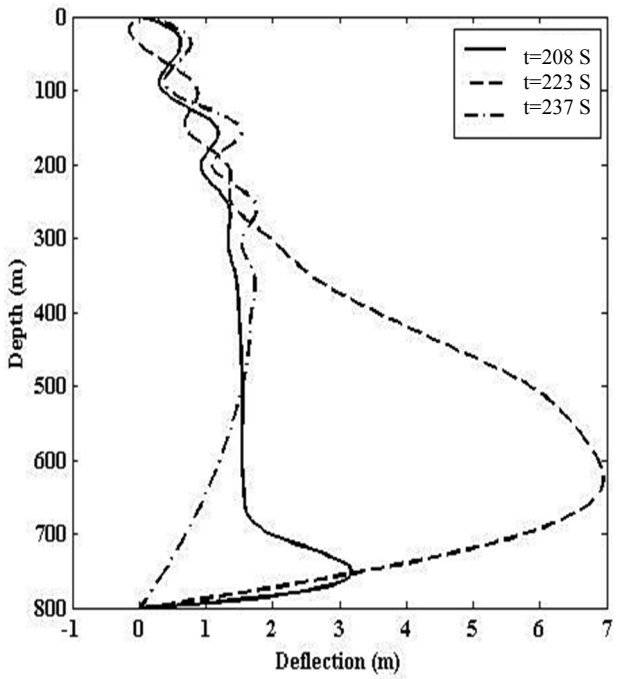
۳- بحث و استخراج نتایج

حل عددی معادلات (۲) و (۳) با استفاده از روش تفاضل محدود و نیز به کارگیری الگوریتم رانج کاتای مرتبه چهارم، شکل های ۵ و ۶ را به عنوان وضعیت رایزر در سه لحظه زمانی از نوسان سکو بر روی سطح دریا در جهت جریان و در راستای عمود بر جریان به دست می دهد. در لحظه $t=208\ s$ سکو در پایین‌ترین وضعیت خود قرار دارد. در این لحظه به دلیل کاهش چشمگیر کشش در طول رایزر به ویژه در مناطق نزدیک بستر دریا، دامنه نوسان رایزر به شدت افزایش می یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]



شکل ۵- تعادل دینامیکی رایزر در سه لحظه زمانی متفاوت از وضعیت سکو بر روی سطح دریا در راستای جریان



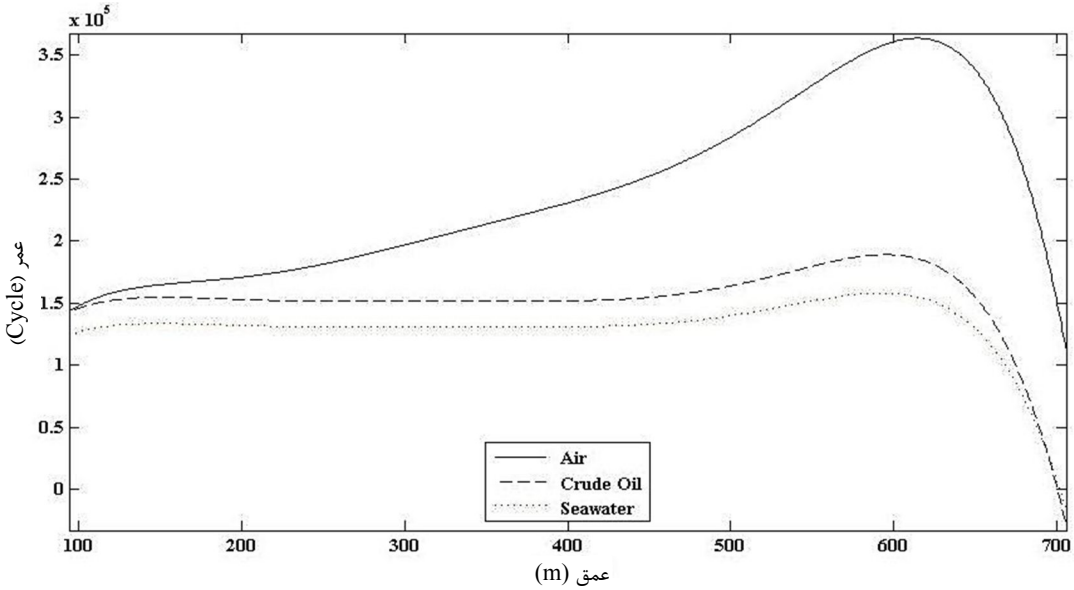
شکل۶- تعادل دینامیکی رایزر در سه وضعیت متفاوت سکو بر روی سطح دریا در راستای عمود بر جریان

در صورتی که میزان پیش‌کشش مناسب نباشد و یا سختی جبرانساز مورد استفاده در محل اتصال سکو به رایزر درست طراحی نشده باشد امکان وقوع کمانش در این منطقه وجود خواهد داشت.

در لحظه $t=223\ s$ سکو در حال بالا رفتن بر روی امواج می‌باشد و کشش در طول رایزر در حال افزایش است. انتظار می‌رود که با افزایش کشش دامنه جابجایی رایزر کاهش یابد اما از این شکل مشخص است که در مناطق میانی رایزر دامنه نوسان رایزر رشد یافته که این امر به دلیل حرکت پالس نوسانی ایجاد شده در لحظه قبلی به سمت سطح دریا می‌باشد.

در $t=238\ s$ سکو به بالاترین وضعیت خود می‌رسد و در این حالت حداکثر میزان کشش در طول رایزر وجود خواهد داشت و دامنه نوسان رایزر کاهش می یابد.

به منظور تخمین عمر شکست رایزر در هر عمق با فرض یک ترک اولیه محیطی با طول مشخص از رابطه رفتار ترک در محیط مربوطه به روش سیمپسون انتگرال گیری می گردد. شکل ۷ نشان می‌دهد که در حضور ترک اولیه به طول ۲ میلیمتر و سیال خورنده، عمر رایزر تا کمتر از نصف کاهش می‌یابد.



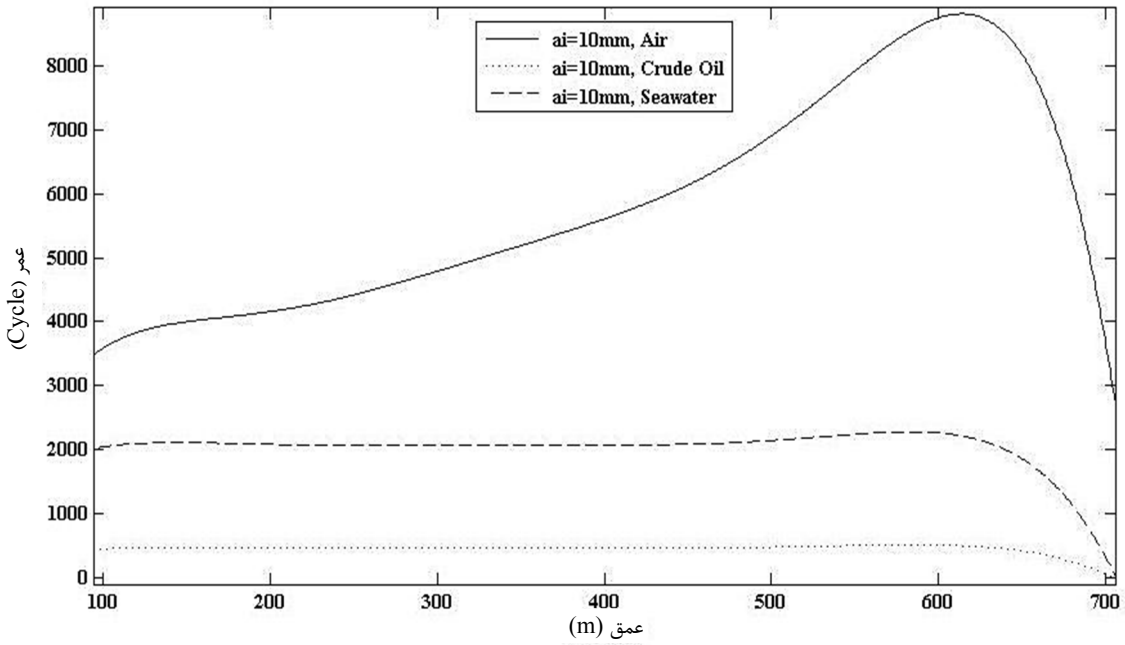
شکل ۷- اثر محیط بر عمر شکست $a_i=2mm$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

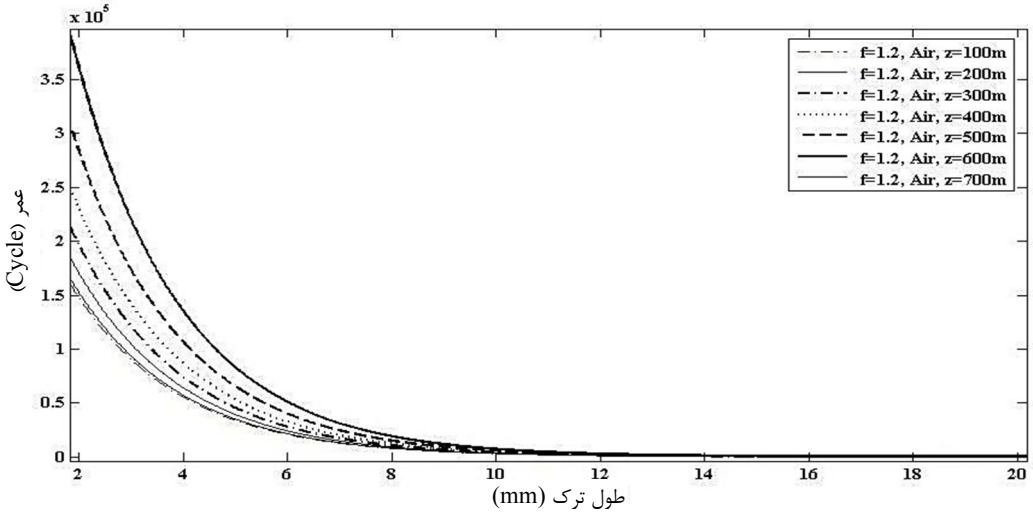
از شکل ۷ کاملاً مشخص است که کاهش عمر در مناطق نزدیک سطح دریا به دلیل حضور سطح بالای تنش چشمگیرتر است.
نکته قابل توجه دیگر در این شکل آن است که در مناطق نزدیک سطح دریا به دلیل سطح بالاتر تنش میزان عمر شکست رایزر تابع دامنه تنش می باشد اما در مناطق نزدیک بستر، با کاهش سطح تنش انتظار می رود که عمر شکست افزایش یابد اما حضور عامل خورنده بر اثرات تنشی غلبه نموده و عمر شکست افت می یابد. موضوع حائز اهمیت دیگر آن است که اثرات ناشی از آب دریا بر رشد ترک و وقوع شکست در این وضعیت بیشتر از نفت ترش است. این موضوع مشهود است که در مناطق نزدیک سطح دریا قدرت خورندگی نفت ترش به اندازه ای نیست که بر اثرات تنشی غلبه نماید. اما آب دریا در این منطقه موجب نرخ رشد افزون تر ترک و در نتیجه کاهش بیشتر عمر گردیده است. در مناطق نزدیک بستر دریا (۶۰۰ متری به بعد) به دلیل اثرات خمشی زیاد دامنه تنش به شدت افزایش یافته و عمر در حضور هر دو عامل خورنده به شدت کاهش می یابد. در شکل ۸ عمر شکست رایزر در حضور ترک اولیه با طول *10mm* در موقعیت های مختلف از طول رایزر را نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ترک با طول بیشتر موجب تنزل شدید عمر شکست نسبت به وضعیتی که ترک اولیه طول *2mm* دارد می‌گردد. در این حالت اثرات محیط خورنده نیز افزون‌تر می‌گردد که علت آن تمرکز تنش بالاتر در نوک ترک و نیز تشدید اثرات خورندگی در این منطقه می‌باشد. در چنین وضعیتی در مناطق نزدیک سطح دریا علاوه بر سطح بالای تنش، طول ترک بیشتر موجب فراهم شدن شرایط نفوذ افزون‌تر عامل خورنده خواهد گردید.

این موضوع سرعت رشد ترک را نسبت به وضعیت قبل افزون‌تر خواهد کرد. بر خلاف شکل ۷ در این وضعیت در مناطق نزدیک به سطح دریا عامل خورنده نفت ترش اثر مشهودی خواهد داشت. همچنین تفاوت شدت تأثیر آب دریا و نفت ترش بر کاهش عمر شکست در این حالت افزون‌تر می‌گردد.
شکل های ۹ (الف) و (ب) اثرات طول اولیه ترک را بر عمر شکست در طول رایزر نمایش می دهد. همان طور که مشخص است با افزایش طول ترک عمر شکست در هر عمق از رایزر به صورت نمایی کاهش می یابد. نکته قابل توجه آنکه کمترین مقدار عمر در این نمودار در عمق های ۱۰۰ متری و ۷۰۰ متری رخ می دهد. علت این امر وجود بیشینه مقدار کشش در مناطق نزدیک سطح دریا و بیشترین مقدار دامنه خمشی در مناطق نزدیک بستر دریا می باشد.
شکل های ۱۰ (الف) و (ب) اثر حضور ترک اولیه با طول مختلف در حضور نفت ترش بر عمر شکست رایزر را نمایش می دهد. مشاهده می گردد که میزان افت عمر در اثر افزایش طول ترک اولیه در حضور سیال خورنده از شتاب بیشتری نسبت به هوا برخوردار است به عبارت دیگر در حضور سیال خورنده از یک مقدار حدی به بعد اثرات اندازه ترک کاهش می یابد و سیال خورنده بر رفتار ترک حاکم خواهد شد. این مقدار حدی با افزایش دامنه و سطح تنش کاهش می یابد به گونه ای که در عمق ۷۰۰ متری رایزر به دلیل دامنه تنش زیاد، اثرات اندازه ترک تقریباً از بین رفته است و تنش خوردگی نقش اساسی در شکست و رشد ترک را بدون توجه به اندازه اولیه ترک ایفا خواهد نمود.

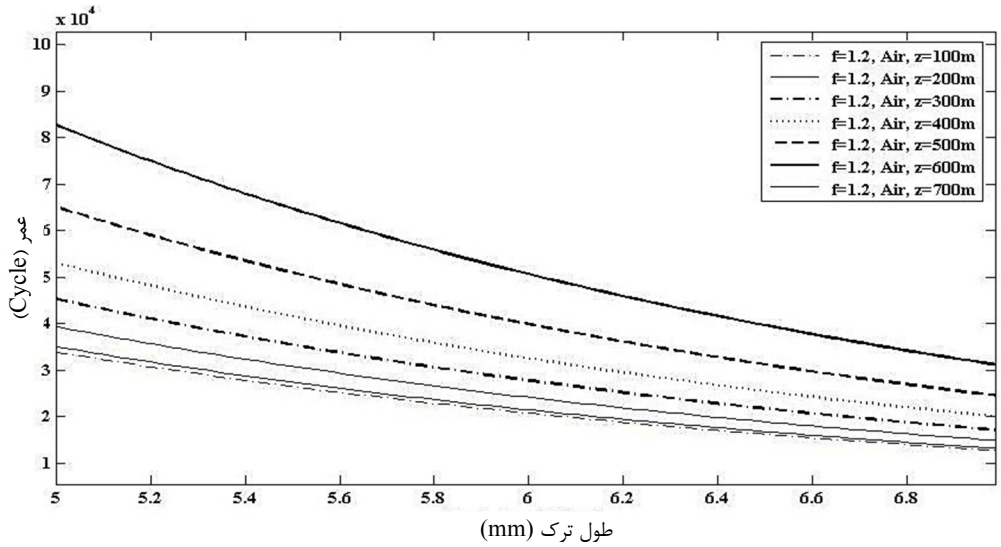


شکل ۸- اثر محیط بر عمر شکست a_i=10mm

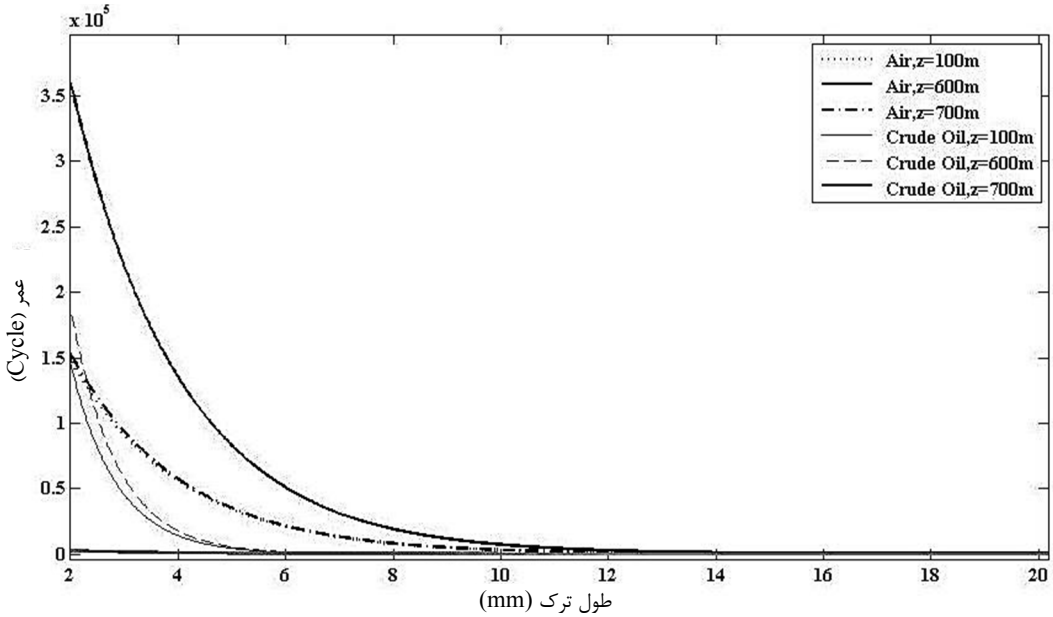
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]



شکل ۹- اثر طول اولیه ترک بر عمر شکست در طول رایزر (الف)



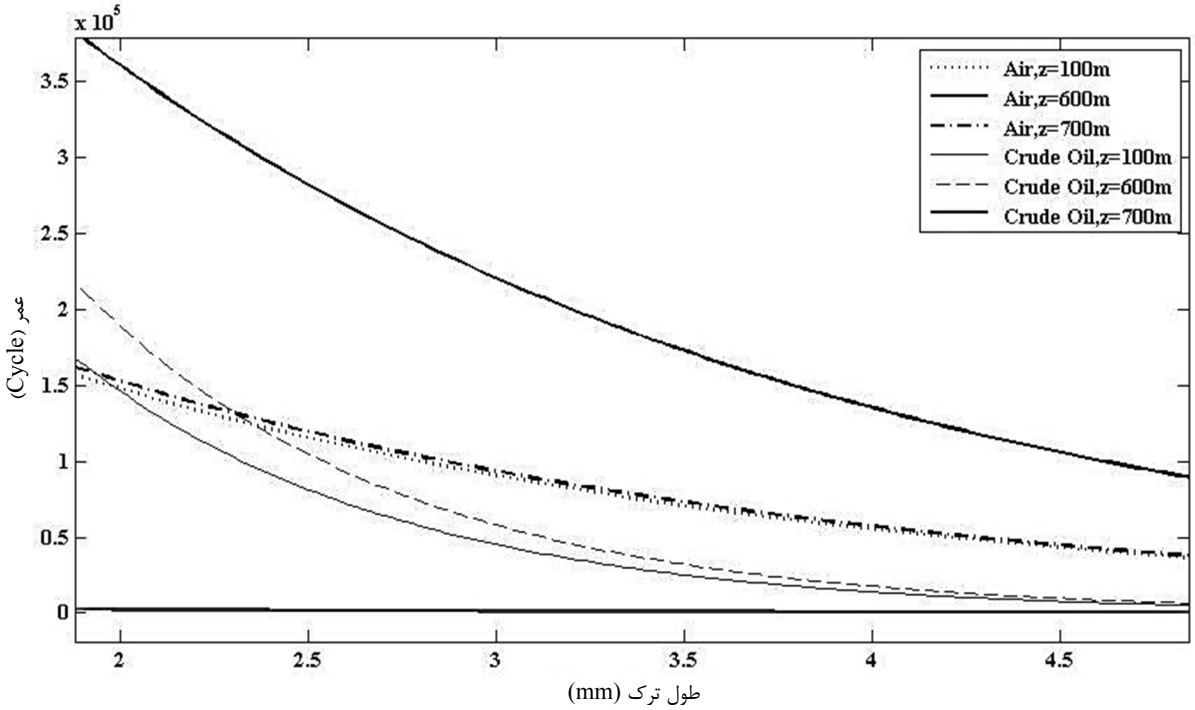
شکل۹- اثر طول اولیه ترک بر عمر شکست در طول رایزر (ب)



شکل ۱۰- اثر محیط خورنده و طول اولیه ترک بر عمر شکست رایزر (الف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

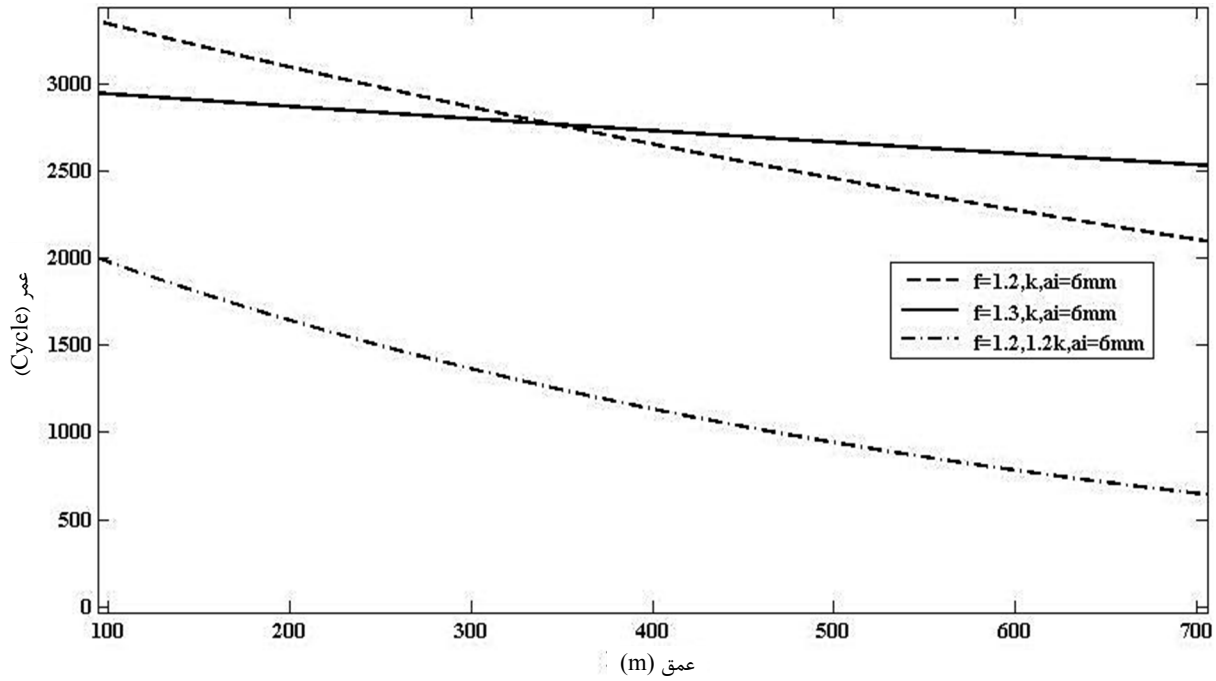
[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]



شکل۱۰- اثر محیط خورنده و طول اولیه ترک بر عمر شکست رایزر (ب)

شکل (۱۱) اثرات پیش کشش و سختی جبرانساز را بر رفتار رایزر حاوی نفت ترش نمایش می دهد. این تصویر مشخص می سازد که سختی جبرانساز اثر بیشتری نسبت به میزان پیش کشش بر عمر شکست رایزر دارد. همچنین مشاهده می گردد که افزایش پیش کشش موجب افزایش عمر شکست در مناطق نزدیک بستر دریا می گردد که علت این امر کاهش دامنه تنش های خمشی در این مناطق است.

اما از سوی دیگر در مناطق نزدیک سطح دریا با رشد سطح تنش میزان عمر شکست رایزر کاهش می یابد. نکته قابل توجه دیگر آن است که با افزایش کشش در طول رایزر نرخ تغییرات عمر شکست در طول رایزر کاهش می یابد. علت این امر کاهش دامنه تنش های خمشی ناشی از افت تشکیل و حرکت نوسانات در نزدیکی بستر دریا می باشد.



شکل (۱۱) اثر سختی جبرانساز و پیش کشش بر عمر شکست رایزر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه عمر شکست رایزرهای دریایی در حضور محیط خورنده پرداخته شد. اهم نتایج حاصل شده عبارتند از:

۱. از یک عمق به بعد اندازه ترک اولیه اثری بر رشد و شکست ندارد و عامل خورنده و تنش خمشی نقش اصلی را ایفا می‌کنند.

۲. در طول ترک‌های کم و در نزدیکی مناطق سطح دریا اثر سطح تنش بر خورندگی نفت ترش غلبه دارد اما شدت اثر حضور آب دریا در این مناطق قابل توجه است.

۳. با افزایش عمق، میزان عمر شکست افزایش می‌یابد. علت این امر کاهش سطح تنش ناشی از اثرات وزن می‌باشد اما در مناطق نزدیک بستر دریا کاهش چشمگیر عمر شکست مشاهده می‌گردد. علت این امر را می‌توان تنش‌های خمشی ناشی از اثرات شلاقی پالس‌های نوسانی تشکیل شده در این مناطق دانست. به عبارت دیگر در این مناطق پالس‌های با انرژی زیاد تشکیل می‌شوند و با حرکت در طول رایزر انرژی خود را به تدریج از دست خواهند داد و اثرات خمشی کمتری را در پی خواهند داشت.

۴. افزایش طول ترک اولیه تا یک مقدار حدی به صورت نمایی موجب کاهش عمر شکست رایزر می گردد و از این مقدار حدی به بعد تمرکز و میدان تنش ایجاد شده در نوک ترک به اندازه ای خواهد بود که بر رفتار شکست در طول رایزر غلبه خواهد نمود. این مقدار حدی با افزایش دامنه تنش و نیز حضور سیال خورنده کاهش خواهد یافت به گونه ای که در عمق ۷۰۰ متری از رایزر که حداکثر دامنه تنش متناوب وجود دارد، اندازه حدی ترک به حداقل خود می رسد.

۵. در مناطق نزدیک بستر دریا علاوه بر عامل خورنده، تنش‌های خمشی نقش افزون‌تری در کاهش عمر ایفا می‌کنند. بنابراین در صورت وجود ترک‌های ریز در این منطقه و حضور عامل خورنده تنها با کاهش خمش در این ناحیه می‌توان عمر شکست رایزر را افزایش داد.

نکته قابل توجه دیگر آن‌که به منظور افزایش عمر شکست رایزر در مناطق نزدیک سطح دریا می‌توان از کاهش پیش‌کشش بر رایزر بهره برد اما این موضوع افزایش تنش خمشی در عمق را در پی خواهد داشت.

از سوی دیگر با اصلاح ضریب سختی جبرانساز مورد استفاده در سکو می‌توان اثر حرکت سکو بر رایزر به ویژه در نزدیکی بستر را کاهش داد. بنابراین ترکیب مناسبی از میزان پیش‌کشش و سختی جبرانساز می‌تواند به منظور کنترل عمر شکست رایزر در نزدیکی سطح و بستر دریا مؤثر واقع شود.

ارائه راهکارهایی که به صورت موضعی افزایش کشش به منظور کاهش خمش در نزدیکی بستر را به دنبال داشته باشد می‌تواند در این زمینه در اولویت باشد.

۵- مراجع

1- Williamson, C.H.K. and Govardhan, R., (2004), *Critical mass in vortex-induced vibrations of a cylinder*, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Vol.23, p.17-27.

2- Sarpkaya, T.A., (2004), *Critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations*, Journal of Fluids and Structures, Vol.19, p.389-447.

3- Gabbai, R.D. and Benaroya, H., (2005), *An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders*, Journal of Sound and Vibration, Vol.282, p.575-616.

4- Yan.Qiu, D., (1994), *Vortex-excited nonlinear vibration of tension leg of ocean platform in wave and current*, ActaOceanologicaSinica, Vol.16, p.121-129.

5- Chi, M., Yan-Qiu, D. and Zhi-Min, H., (2000), *Vortex-induced nonlinear response of TLP*, Journal of Tianjin University, Vol.33, p.701-706.

6- Tang, Y.G., Zhang, S.X. and Yi, C., (2006), *Nonlinear vibration behaviors of casing pipe in the deep water*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 297, p.408-413.

7- Vikestad, K. and Halse, K.H., (2000), *VIV lift coefficients found from response build-up of an elastically mounted dense cylinder*, Proc. 10th.

8- Willden, R.H.J. and Graham, J.M.R., (2003), *Numerical simulation of the flow about deep water riser pipe*, Ph.D. Thesis, University of London.

9- Suzuki, H., Takano, K., Enomoto, K. and Oka, N., (2004), *Axial and lateral response of a deepsea riser for scientific drilling*, Proceedings of Twenty Third International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, British Columbia, Canada, Paper 2004-51094.

10- Kuiper, G.L., Brugmans, J. and Metrikine, A.V., (2008), *Destabilization of deep-water risers by a heaving platform*, Journal of Sound and Vibration, Vol.210, p.541-557.

11- Baarholm, G.S., Larsen, C.M. and Lie, H., (2006), *On fatigue damage accumulation from in-line and cross-flow vortex-induced vibrations on risers*, Journal of Fluids and Structures, Vol.22, p.109–127.

12- Ebara, R., (2006), *Corrosion fatigue phenomena learned from failure analysis*, Journal of Engineering Failure Analysis, Vol.13, p.516-525.

13- Ebara, R., Watanabe, E., Yamada, Y., Yajima, H. and Fushimi, A., (1993), *Corrosion fatiguestrength of ship structural plates in sour crude oil*. Journal of the Society of NAVAL Architecture of Japan, 173, 337-350.

14- Maddox, S. J., Pargeter, R. J. and Woollin, P., (2005), *Corrosion fatigue of welded C-Mn steel risers for deepwater applications: a state of the art review*', OMAE2005-67499, Proceedings of OMAE 2005: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, New York.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]

15- Rao. S. S., (1995), *Mechanical Vibration*, Addison-Wesley.
16- Chakrabarti, S.K., (2005), *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier.
17-Dowling, N.E., (1999), *Mechanical Behavior of Materials*, Wiley, New York.
18- Hudak, S.J. Jr., Feiger, J.H. and Patton, J.A., (2010), *The Effect of Cyclic Loading Frequency onCorrosionFatigue Crack Growth in High Strength Riser Materials*, 29th Int'l. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE201020705, Shanghai.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-26]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.18.1.5]