تعيين طول عمر مخازن تحت فشار CNG، داراي ترك‌هاي سطحي

عبدالله منطقي[۱]، مجيد شمس[۲]، محمود موسوي مشهدي[۳]
شركت طراحي مهندسي و تامين قطعات ايران خودرو (سايكو)، كيلومتر ۱۳ جاده مخصوص كرج، تهران، ايران.
Manteghi_1@Yahoo.com

چكيده

براي طراحي ايمن لوله‌ها و مخازن تحت فشار داراي ترك‌هاي سطحي و محيطي، معمولاً در نظر گرفتن رشد ترك‌هاي خستگي و شكست در مودهاي مختلف ضروري به نظر مي‌رسد. در اين مقاله به بررسي مكانيك شكست خطي يك ترك سطحي نيم بيضوي كه در سطح داخلي و يا خارجي يك مخزن تحت فشار قرار گرفته است، پرداخته شده است. در تحقيق حاضر مسألة محاسبة ضريب شدت تنش جهت تخمين عمر باقي ماندة ترك‌هاي نيم بيضوي كه در محل تمركز تنش مخازن تحت فشار ايجاد شده‌اند، بصورت حل عددي و بروش تحليل پيشرفتة المان محدود محلي انجام پذيرفته است. يكي از روش‌هاي معمول براي حل مسائلي كه دقت حل عددي آنها بدليل كم بودن تعداد المانها و يا كوچك بودن ابعاد المانها كم است، استفاده از روش زيرمدلسازي است. براي مثال تعداد المانهاي مورد نياز براي مش‌بندي سه‌بعدي كل حجم يك مخزن تحت فشار بسيار زياد خواهد بود. اين امر منجر به حل‌هاي بسيار زمان‌بر خواهد شد و مسئله از اهداف طراحي خارج خواهد شد. در اين تحقيق براي غلبه بر اين مشكل از روش المان محدود و تكنيك زير مدلسازي استفاده شده است. در ابتدا يك حل عددي مربوط به مخزن تحت فشار بدون در نظر گرفتن ترك بدست آمده‌است، سپس ميدان جابجائي محاسبه شده بر روي مرز زير مدل- كه ترك در آن مدل شده است- اعمال گرديده و نتايج مورد نظر اخذ گرديده است.

واژه‌هاي كليدي: مخازن تحت فشار- گاز CNG- ترك نيم بيضوي- زيرمدلسازي- ضريب تنش- تخمين عمر مخزن

۱) مقدمه

با عنايت به تحولات چشمگير در صنعت خودروسازي و موفقيت شركت‌هاي خودروساز كشور در تبديل سوخت انواع اتوبوس، مينی‌بوس، سواري، كاميون و كاميونت از گازوئيل و بنزين به عنوان سوخت‌هاي آلاينده (و در عين حال با ارزش) به گاز طبيعي، كاربرد وسيع مخازن CNG و مسائل مربوط به آن از جمله خوردگي، به عنوان يكي از دغدغه‌هاي اساسي صنعتگران و كاربران مطرح مي‌باشد. لازم به ذكر است كه در كشور ما بدليل وجود ذخاير عظيم گازي، تبديل سوخت خودروها از نظر اقتصادي نيز قابل توجيه خواهد بود. در اين تحقيق تلاش شده است تا با استفاده از تكنيك زير مدل‌سازي، ميزان عمر مخزن حاوي ترك در بخش استوانه‌اي تعيين گردد.

از آنجا كه مخازن فولادي بخش عمده‌اي از مخازن CNG را تشكيل مي‌دهند، در اين تحقيق به بررسي ترك و پديدة شكست در اين نوع از مخازن پرداخته مي‌شود. به‌طور مثال آسيب‌هاي ناشي از خوردگي عمومي جزء محتمل‌ترين مواردي است كه در اين مخازن اتفاق مي‌افتد. اما چون اين نوع آسيب ضخامت مخزن را چندان كاهش نمي‌دهد، اثر كمي روي عمر

۱- كارشناس ارشد مهندسي مكانيك- امور تكوين پروژه هاي جديد- شركت سايكو
۲- دانشجوي كارشناسي ارشد مهندسي مكانيك- دانشكده فني دانشگاه تهران
۳- استاد مهندسي مكانيك- دانشكده فني دانشگاه تهران

مفيد مخزن داشته و عامل تعيين‌كننده‌اي در ميزان عمر مخزن نيست [۴]. در حالي‌كه در عمل صدمات جدي و شديدي بر اثر آسيب‌هاي موضعي مانند رشد ترك ناشي از معايب بوجود آمده هنگام ساخت مخزن يا حفره‌هاي بوجود آمده در اثر خوردگي، پديد مي‌آيند.

در يكي از كارهاي انجام شدة قبلي ميزان عمر مخزن با وجود ترك داخلي در بخش انتقال مخزن در سه سطح مختلف رطوبت بررسي شده است [۴]. در تحقيق حاضر بررسي مشابهي با وجود ترك در بخش استوانه‌اي انجام شده است.

در حالت كلي دو نوع آسيب داخلي مي‌بايست مورد بررسي قرار گيرند، اولين آن ترك خوردگي تنشي[1] است كه فرآيند رشد ترك تحت يك تنش ثابت يا شبه ثابت مي‌باشد. نوع آسيب كه جدي‌تر از مورد اول است ترك خستگي خوردگي[2] روي سطح مخازن CNG مي‌باشد. اين نوع آسيب ناشي از معايب به‌وجود آمده هنگام ساخت مخزن و يا حفره‌هاي به‌وجود آمده در اثر خوردگي است. اين آسيب‌ها در اثر بارگذاري‌هاي خستگي، مانند پر و خالي شدن‌هاي مكرر هنگام سوخت‌گيري مجدد رشد مي‌كنند. عمر خستگي مخازن سوخت به شدت تحت تأثير وجود شبه ترك‌هايي است كه در طول فرآيند ساخت در مخزن برجاي مي‌مانند.

در تحقيق ديگري بروش الاستيك، ضريب شدت تنش تنها در يك محيط خشك و براي ترك خارجي، با استفاده از روش زير مدل‌سازي بدست آمده است. البته اين تحقيق بيش از اين جلو نرفته و به مبحث خستگي نپرداخته است [۹]. در مقاله حاضر بروش الاستيك- پلاستيك ضرايب شدت تنش براي ترك‌هاي داخلي و خارجي بدست آمده است. سپس با كمك ضرايب شدت تنش محاسبه شده و همچنين داده‌هاي نرخ رشد ترك، عمر خستگي به‌صورت تابعي از اندازة اولية نقص (ترك)، محاسبه شده‌است. يكي از كارهاي جديد اين تحقيق، امكان سنجي استفاده از حل موجود براي ترك نيم‌بيضوي در صفحة تحت كشش و حل عددي ترك در بدنة مخزن با استفاده از ضريب تصحيح مي‌باشد.

۲) آشنائي با مخازن تحت فشار CNG

مخازن CNG به دليل ملاحظاتي همچون سهولت ساخت و استحكام، اغلب به شكل كروي يا استوانه‌اي ساخته مي‌شوند. ساخت آستر فلزي مخازن به شكل مستطيلي (جعبه‌اي)، عايق كاري آن را مشكل مي‌كند و همچنين از استحكام كمتري به علت جوشكاري در درزها برخوردار مي‌باشد. در عوض مخازن استوانه‌اي براحتي قابل ساخت مي‌باشند. در دو سر اين مخازن، دو نيمكرة عدسي شكل به روش‌هاي خاص شكل‌دهي ايجاد مي‌گردند. بنابراين مخازن گاز طبيعي بدون درز و جوش هستند.

شرايط طراحي و سرويس براي مخازن CNG، فشار 200 Bar در دماي 15 °C است. بيشينة پرشدگي مخزن 200 Bar است كه بيشينة دماي مجاز را هم در مخزن ايجاد مي كند، اين حالت در هنگام پرشدن مخزن در سيستمهاي سريع رخ مي‌دهد. كمترين دفعات پرشدن يك مخزن در طول عمر خود ۱۵۰۰۰ مرتبه و حداكثر عمر يك مخزن معمولاً ۲۰ سال است [۳]. قابليت‌هاي تعمير، سرويس‌دهي و بازرسي متناوب مخازن تحت فشار گاز طبيعي از ديگر موارد مهمي هستند كه در طراحي و ساخت اين مخازن بايد توسط سازندگان آنها در نظر گرفته شوند. مخازن CNG در چهار كلاس (كلاس ۱، ۲، ۳ و ۴)، توليد مي‌گردند. مخازن نوع اول، (مخازن تمام فولادي)، به سه روش زير توليد مي‌گردند:

- توليد مخزن از مادة اولية ورق
- توليد مخزن از مادة اولية لوله
- توليد مخزن از مادة اولية شمشال[3]

[1] : Stress Corrosion Cracking (SCC)
[2] : Corrosion Fatigue Crack
[3] : Billet

۳) تحليل مدل سالم مخزن به روش اجزاء محدود

مخزن مورد تحليل داراي طول ۹۰۰ ميليمتر، شعاع داخلي ۱۲۰ ميليمتر، ضخامت ۸ ميليمتر و فشار کاری 200 Bar مي‌باشد. هدف از اين بخش توجيه موقعيت درنظر گرفته شده براي ترك بر روي مخزن است. لذا به تحليل مخزن CNG نمونه به روش‌هاي تحليلي و عددي المان محدود، (سه‌بعدي و متقارن محوري)، پرداخته شده است. در جدول ۱ مقادير مؤلفه‌هاي تنش حاصل شده از تحليل‌هاي عددي و غير عددي مقايسه گرديده است.

در جدول زير ملاحظه مي‌گردد كه مقادير مؤلفه‌هاي تنش بدست آمده از روش‌هاي مختلف، با دقت قابل قبولي نزديك يكديگرند. حال توجيه مناسبي براي در نظرگرفتن موقعيت ترك در قسمت استوانه‌اي و در جهت محوري مخزن به دست آمده است. در حقيقت مطابق پيش‌بيني اوليه، مقدار تنش مماسي[1] در بخش استوانه‌اي، تعيين كنندة موقعيت و جهت ترك در مخزن مي‌باشد.

جدول ۱: مقايسة مقادير مؤلفه‌هاي تنش بدست آمده از روش‌هاي حل مختلف

واحد: مگاپاسكال	$\overline{\sigma}$	σ_z	σ_θ	σ_r
جدار نازك	277	160	320	0
جدار ضخيم	-	145	290~310	0~-20
حل عددي دوبعدي	285	189	315	-13.9
حل عددي سه‌بعدي	289	187	314	-20.1
حل زير مدل	286	151	-	-

٤) زير مدل‌سازي ترك به صورت سه‌بعدي

براي ساده كردن تحليل سه‌بعدي از يك مدل دو قسمتي عمومي و جزئي استفاده شده‌است. به اين ترتيب كه با تحليل يك مدل سه‌بعدي مخزن بدون ترك، توزيع عمومي تنش، كرنش و جابجائيها در مخزن به‌دست آمده است. اين توزيع تنش عمومي به عنوان شرايط مرزي براي تحليل جزئي ناحية داراي ترك مورد استفاده قرار خواهد گرفت. مدل مورد استفاده در تحليل جزئي، يك تكه از بخش استوانه‌اي مخزن است كه در آن ترك سه‌بعدي قرار دارد.

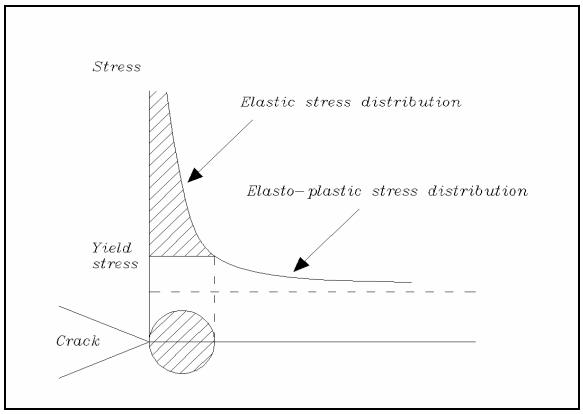
٤-۱) مواد مورد استفاده و مدلسازي آن

بيشتر مخازن CNG از فولاد 4130X ساخته مي‌شوند. روشن است كه در مواد واقعي نمي‌توان از ويژگي‌هاي الاستيك مواد به تنهائي جهت تحليل ترك استفاده كرد. در حقيقت از نظر تئوري و در نوك ترك در حالت الاستيك صرف، مقدار تنش بينهايت (خيلي بزرگ)، خواهد بود. درحالي‌كه حد مقدار واقعي تنش توسط رفتار تسليم ماده كنترل و هدايت مي‌شود. در نتيجه بايد ظهور يك محدودة پلاستيك را در اطراف نوك ترك انتظار داشته باشيم. اين ناحيه بخوبي در شكل ۱ به تصوير كشيده شده است.

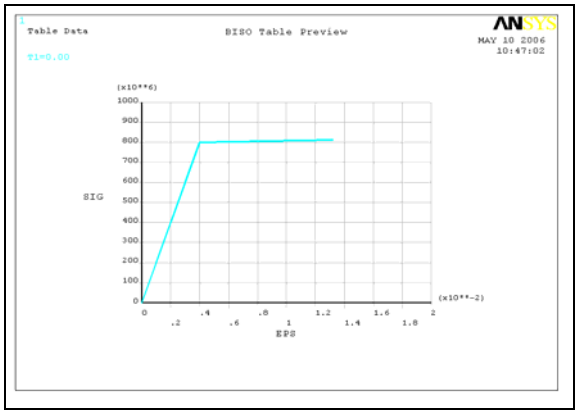
لذا جهت هرچه نزديك‌تر شدن تحليل به حالت واقعي، از مدل‌سازي پلاستيك استفاده شده‌است. در اين حالت نمودار تنش-كرنش فولاد 4130X با دو خط راست تقريب زده شده‌است. در شكل ۲ اين منحني فرضي نشان داده شده‌است.

در اين نمودار شيب قسمت اولية منحني كه همان مدول الاستيسيته است، برابر 200 GPa، مقدار تنش سيلان برابر 800 MPa و شيب قسمت سخت شوندة پلاستيك آن، (مدول پلاستيك)، برابر 1380 MPa درنظر گرفته شده‌است [۸]. چقرمگي شكست (K_{IC})، اين فولاد به‌طور معمول بالاي $85\mathbf{MPa}\sqrt{\mathbf{m}}$ مي‌باشد [۴].

[1] : Hoop Stress



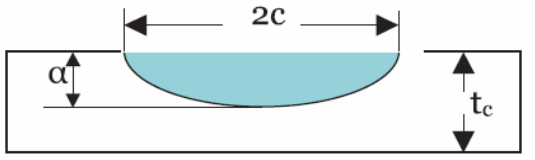
شكل ۱: توزيع الاستيك و الاستو پلاستيك تنش در نوك ترك



شكل ۲: منحني تنش-كرنش ساده شدة مدل فولاد **4130X**

٤-۲) هندسه و ابعاد ترك

در شكل ۳ پارامترهاي هندسي مشخص كنندة ابعاد ترك موجود در سطح مخزن مشخص گرديده است.

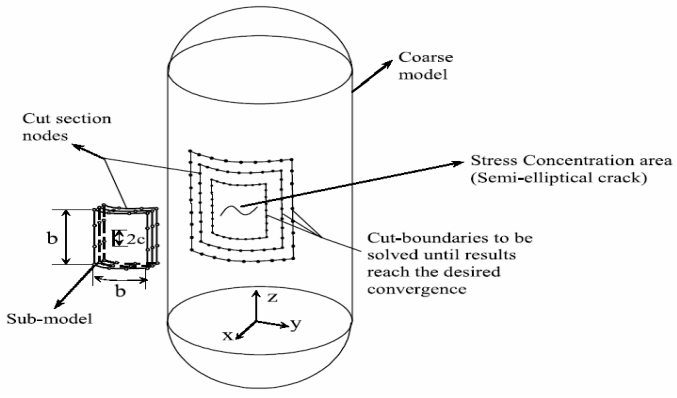


شكل ۳: ابعاد هندسي ترك

در شكل ۳، t_c، ضخامت بدنة مخزن است كه در اين تحقيق برابر مقدار ۸ ميلي‌متر فرض گرديده است. $2c$ همان طول ترك بوده و a نشان‌دهندة عمق ترك مي‌باشد. حال با توجه به تجربيات و پروژه‌هاي مشابه انجام شده [۹]، دامنة تغييرات عمق ترك و طول ترك تعيين گرديد. بر اين اساس تغييرات نسبت عمق ترك به ضخامت مخزن، a/t_c از مقدار ۰/۲ تا ۰/۸ و با گام ۰/۲ در نظر گرفته مي‌شود و به ازاي يك عمق ترك ثابت، تغييرات نسبت عمق ترك به نصف طول ترك، a/c از مقدار ۰/۴ تا ۱ و با گام ۰/۲ در نظر گرفته مي‌شود.

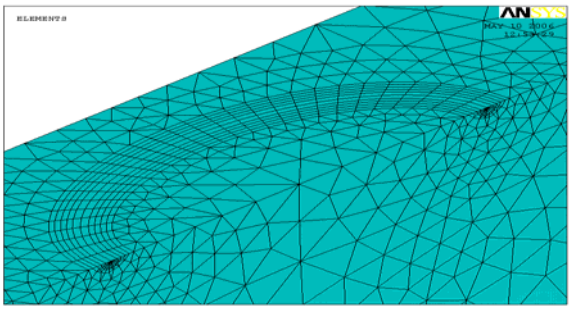
٤-۳) هندسه و ابعاد زيرمدل

در شكل ۴ شماتيكي از مرز برش زير مدل در مخزن نشان داده شده‌است.

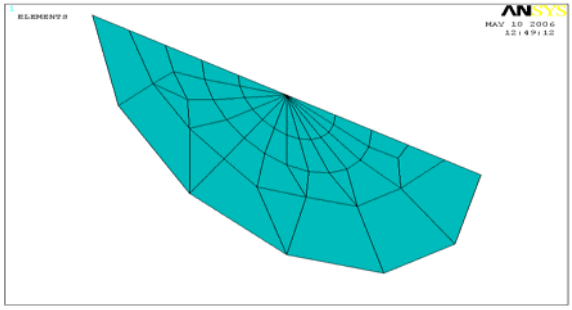


شكل ٤: شماتيك نحوة زيرمدل‌سازي ترك

در اين مورد نيز با توجه به تجربيات و پروژه‌هاي مشابه انجام شده [۹] مشخص گرديده است كه درصورتي‌كه ابعاد زير مدل، (b) بيشتر از ۲ برابر طول ترك، $(2c)$ باشد، نتايج حاصله مستقل از ابعاد زير مدل خواهد بود. لذا با توجه به بزرگترين ترك در نظر گرفته شده به عمق ۶/۴ ميليمتر و به طول ۳۲ ميليمتر، طول زير مدل مقدار ۶۴ ميليمتر درنظر گرفته شده‌است. در شكل‌هاي ۵ و ۶، زيرمدل حاوي ترك بصورت مش‌بندي شده آورده شده است.



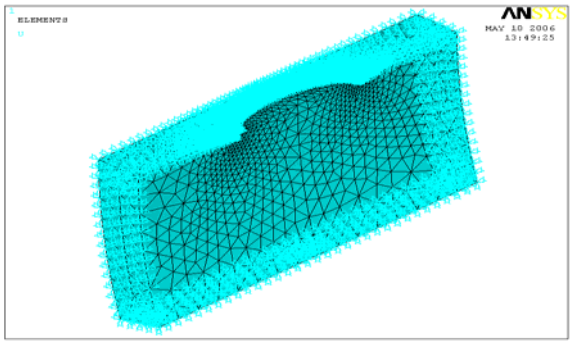
شكل ٦: ايجاد مش سه‌بعدي در زير مدل



شكل ٥: مش‌زدن دوبعدي ترك و ايجاد نقطة تكين در نوك ترك

٤-٤) اعمال شرايط مرزي

اولين شرط مرزي اعمال فشار داخلي مخزن به سطح داخلي زير مدل مي‌باشد. شرط مرزي دوم همان جابجائي‌هاي مرز برش است كه با استفاده از تحليل مخزن سالم به‌دست آمده است. البته بايد توجه كرد كه اين شرط مرزي بر روي سطح ترك نيم بيضوي كه جزئي از سطح برش زير مدل مي‌باشد، اعمال نمي‌گردد (شكل ۷).



شكل ۷: اعمال شرايط مرزي بر روي سطح برش زير مدل

۵) محاسبة ضريب شدت تنش ترك

با توجه به اينكه ضريب شدت تنش در عميق‌ترين نقطة ترك‌هاي نيم بيضوي پارامتر غالب در تعيين عمر خستگي است و در حقيقت اين پارامتر است كه در ارزيابي عمر مخزن مورد استفاده قرار مي‌گيرد، به محاسبة ضريب شدت تنش در عمق ترك پرداخته شده است. با توجه به رويه‌هاي المان محدود، محاسبة ضريب شدت تنش بر پاية ميدان جابجائي در اطراف لبة ترك مي‌باشد [۹]. در حقيقت با محاسبة جابجائي‌هاي گره‌اي سطوح ترك، $(\hat{v})$ به روش المان محدود، معادلة (۱) مقدار ضريب شدت تنش را محاسبه خواهد كرد.

$$K = \frac{G\sqrt{2\pi} \times A}{(1+\kappa)} \quad (۱)$$

در معادلة (۱)، $A = \lim_{r\to 0} \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{r}}$ ، r فاصله از نوك ترك، G مدول برشي الاستيك، $\kappa = 3-4\nu$ براي حالت كرنش صفحه‌اي و يا $\kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu}$ براي حالت تنش صفحه‌اي مي‌باشد.

مقادير ضريب شدت تنش مربوط به ترك‌هاي داخلي و خارجي بصورت ميانگين دو حالت تنش صفحه‌اي و كرنش صفحه‌اي در جداول ۲ و ۳ مشخص گرديده است.

جدول ۳: ضريب شدت تنش ترك خارجي در عمق ترك

$a/t_c = 0.8$	$a/t_c = 0.6$	$a/t_c = 0.4$	$a/t_c = 0.2$	$\mathbf{Pa\sqrt{m}}$
56,368,620	39,415,272	29,679,388	21,493,014	$a/c = 0.4$
50,817,165	38,122,968	28,452,967	20,269,834	$a/c = 0.6$
45,265,710	33,599,904	25,018,988	18,697,175	$a/c = 0.8$
42,703,500	32,307,600	24,528,420	17,473,995	$a/c = 1.0$

ول ۲: ضريب شدت تنش ترك داخلي در عمق ترك

$a/t_c = 0.8$	$a/t_c = 0.6$	$a/t_c = 0.4$	$a/t_c = 0.2$	$\mathbf{Pa\sqrt{m}}$
54,310,000	40,638,074	30,834,636	22,976,481	$a/c = 0.4$
50,834,160	38,016,262	28,829,132	21,308,833	$a/c = 0.6$
46,923,840	35,066,725	26,071,562	19,455,891	$a/c = 0.8$
43,448,000	32,772,640	25,068,810	18,529,420	$a/c = 1.0$

با توجه به حساسيت بيشتر ضريب شدت تنش به تغيير عمق ترك نسبت به تغيير طول ترك، و به جهت ساده سازي و هرچه كاربردي‌تر شدن مسئله، پارامتر مؤثر در محاسبة عمر، عمق ترك در نظر گرفته شده است. جهت تائيد مقادير فوق، نگاهي به نمونة محاسبة ضريب شدت تنش ترك‌هاي نيم بيضوي براي ترك در صفحه و مقايسة روند تغييرات آن با روند تغييرات ضرايب شدت تنش بدست آمده، (جداول ۲ و ۳)، جالب توجه خواهد بود. اطلاعات زير در قالب شكل ۳ و جدول ۴ و معادلة (۲)، از مرجع [۷] استخراج شده‌است.

جدول ٤: مقدار تعريف شده پارامتر E_2 با تغيير a/c

E_2	1.000	1.016	1.051	1.097	1.151	1.211	1.277	1.345	1.418	1.493	$\pi/2$
a/c	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

$$K_I \approx \frac{1.12}{E_2}\sigma_\infty \sqrt{\pi a} \qquad (۲)$$

جهت مقايسه، نسبت دو مقدار پيش‌بيني شده براي ضريب شدت تنش در صفحه براي حالات $a/c = 0.4, 0.6 \& 0.8$ نسبت به حالت $a/c = 1$ ، در جدول ۵ با مقادير متناظر حاصل از تحليل عددي سه‌بعدي مقايسه شده‌است.

جدول ۵: مقايسة حل تئوري صفحه با حل عددي مخزن

	$\frac{K_I\left(\frac{a}{c}=0.4\right)}{K_I\left(\frac{a}{c}=1.0\right)}$	$\frac{K_I\left(\frac{a}{c}=0.6\right)}{K_I\left(\frac{a}{c}=1.0\right)}$	$\frac{K_I\left(\frac{a}{c}=0.8\right)}{K_I\left(\frac{a}{c}=1.0\right)}$
Internal $a/t=0.2$	1.24	1.15	1.05
Internal $a/t=0.4$	1.23	1.15	1.04
Internal $a/t=0.6$	1.24	1.16	1.07
Internal $a/t=0.8$	1.25	1.17	1.08
External $a/t=0.2$	1.23	1.16	1.07
External $a/t=0.4$	1.21	1.16	1.02
External $a/t=0.6$	1.22	1.18	1.04
External $a/t=0.8$	1.32	1.19	1.06
Crack in Plate	1.36	1.23	1.11

همان‌طور كه ملاحظه مي‌شود، نسبت‌هاي فوق تطابق مناسبي دارد. جهت مقايسة مقادير مطلق ضريب شدت تنش تحليل سه‌بعدي با مقادير محاسبه شده از صفحة تحت كشش با تنش σ_θ به‌دست آمده از تحليل مخازن جدار نازك، جدول ۶ براي نسبت $a/c=1$ تشكيل گرديده است.

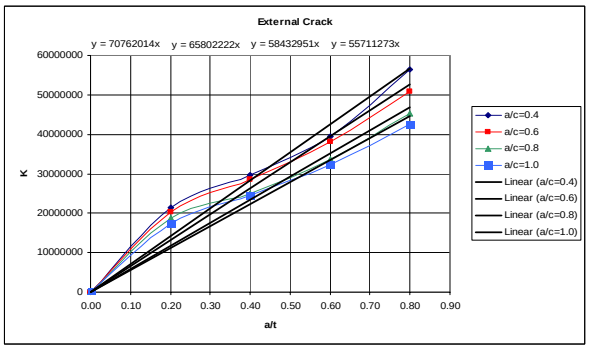
با درنظر گرفتن خطاي ناشي از تجربي بودن مباحث خستگي و خصوصاً خستگي ترك، مقادير فوق قابل قبول خواهد بود. نتيجة مفيد جدول ۶، امكان استفاده از يك ضريب تصحيح و اطلاعات ترك نيم‌بيضوي واقع در صفحه مي‌باشد.

جدول ٦: مقايسة حل تئوري صفحه با حل عددي مخزن براي نسبت $a/c=1$

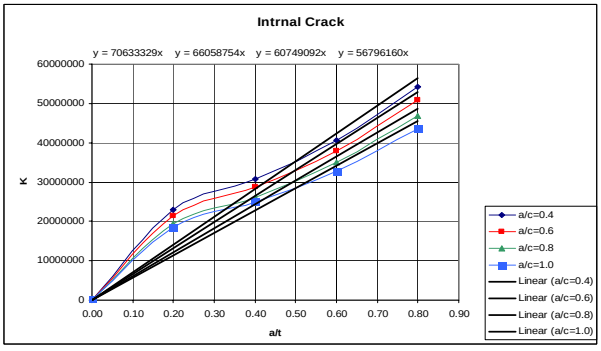
K_{3D}/K_{Plate}	$a/t=0.2$	$a/t=0.4$	$a/t=0.6$	$a/t=0.8$
Internal Crack	115%	110%	117%	134%
External Crack	108%	107%	115%	132%

٦) بررسي پديدة خستگي و محاسبة عمر مخازن CNG

براي تقريب عمر، رابطة عمق ترك را براي يك شكل خاص ترك $(a/c=cte)$، بر حسب ضريب شدت تنش به‌صورت خطي فرض مي‌كنيم. قبل از اين تقريب بايد توجه كرد كه در صورت عدم وجود ترك $(a/t=0)$، ضريب شدت تنشي وجود نخواهد داشت و يا به عبارت ديگر مقدار اين ضريب برابر صفر خواهد بود. لذا براي تقريب خطي، با اضافه كردن نقطة $(0,0)$ از تقريب خطي استفاده مي‌كنيم. در شكل‌هاي ۸ و ۹، منحني ضريب شدت تنش بر حسب عمق ترك به‌همراه تقريب خطي مربوطه آورده شده‌است.

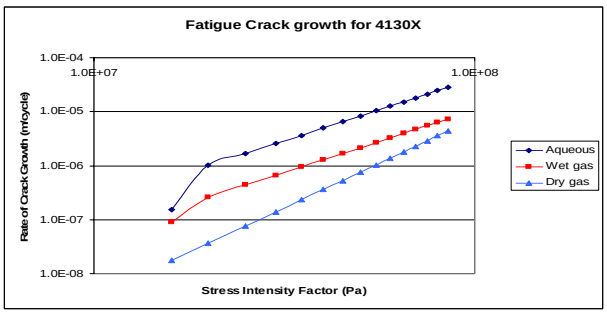


شكل ۸: تغييرات ΔK بر حسب a/t براي ترك داخلي



شكل ۹: تغييرات ΔK بر حسب a/t براي ترك خارجي

به‌صورت كلي رابطة فوق را به‌صورت $\Delta K = H \times (a/t)$ در نظر مي‌گيريم كه پارامتر H شيب خط گذرانده شده از منحني ضريب شدت تنش بر حسب a/t، (شكل‌هاي ۸ و ۹)، مي‌باشد. در شكل ۱۰ روند رشد ترك خستگي براي ماده فولاد مخزن، در سه سطح مختلف رطوبت آورده شده است.



شكل ۱۰: منحني رشد ترك فولاد **4130X** در سه محيط آبي، گاز مرطوب و گاز خشك [٤]

به‌منظور استفاده از اطلاعات داده شده در شكل ۱۰ براي محاسبة عمر خستگي، يك معادله شامل شش متغير به‌كار مي‌رود تا بيانگر يك فرمول رياضي براي محاسبة سرعت رشد ترك‌ها باشد [۴].

$$\frac{1}{da/dN} = \frac{A_1}{\Delta K^{n_1}} + \frac{A_2}{\Delta K^{n_2}} - \frac{A_2}{[(1-R)K_e]^{n_2}} \qquad (۳)$$

A_1، n_1، A_2، n_2 و K_e ثابت‌هاي تجربي هستند كه از نتايج آزمايشگاهي به‌دست مي‌آيند. R نسبت ماكزيمم نيرو (يا تنش) به مينيمم نيرو (يا تنش) در دورة بارگذاري است و مقدار متوسط سطح تنش را بيان مي‌كند. مقادير A_1، n_1، A_2 و n_2 براي سه محيط مختلف آبي، گازي خشك و گازي مرطوب در جدول ۷ داده شده‌اند.

جدول ۷: ثابت‌هاي تجربي معادلة (۳) – [٤]

محيط	نزديك حد آستانه‌اي		بالاتر از حد آستانه‌اي	
	A_1	n_1	A_2	n_2
آبي	8.3×10^{60}	48	2.0×10^{7}	2.3
گاز مرطوب	8.3×10^{60}	48	7.7×10^{7}	2.3
گاز خشك	-	-	1.0×10^{10}	3.3

رابطة (۴) متريك شدة رابطة (۳) است.

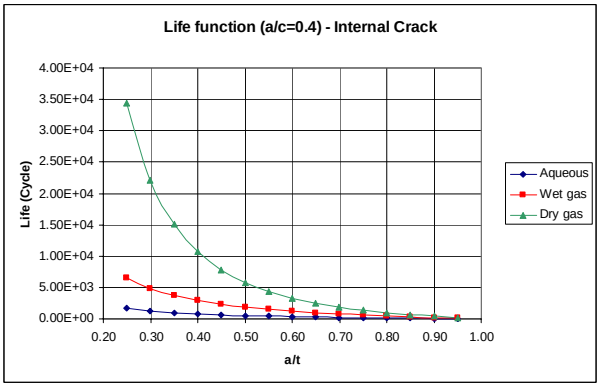
$$\frac{1}{da/dN} = \left(\frac{A_1}{\left(\frac{\Delta K}{1098843.93}\right)^{n_1}} + \frac{A_2}{\left(\frac{\Delta K}{1098843.93}\right)^{n_2}} \right) / 0.0254 \qquad (۴)$$

حال با انتگرال‌گيري از رابطة (۴) خواهيم داشت:

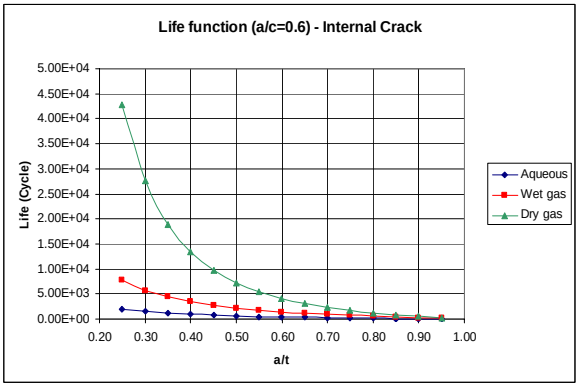
$$N = C_1 \int_{a_0}^{t} a^{-n_1}\, da + C_2 \int_{a_0}^{t} a^{-n_2}\, da \qquad (۵)$$

$$N = \frac{C_1}{-n_1+1}\left(t^{-n_1+1} - a_0^{-n_1+1}\right) + \frac{C_2}{-n_2+1}\left(t^{-n_2+1} - a_0^{-n_2+1}\right) \qquad (۶)$$

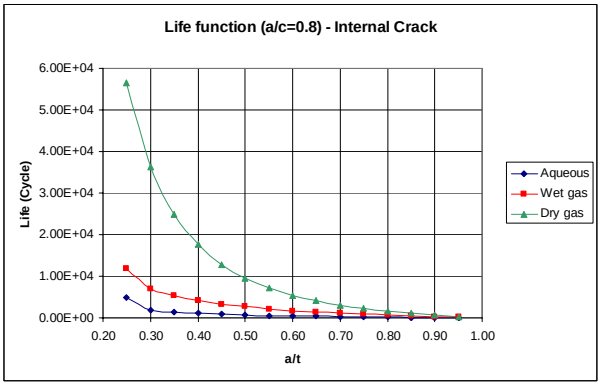
براي مقايسة تابع عمر در حالات مختلف با يكديگر، نمودارها در بازة $a/t = 0.25 \rightarrow 0.95$ و در برخي نمودارها در بازة $a/t = 0.30 \rightarrow 0.95$ رسم شده است. (شكل‌هاي ١١ الي ١٨)



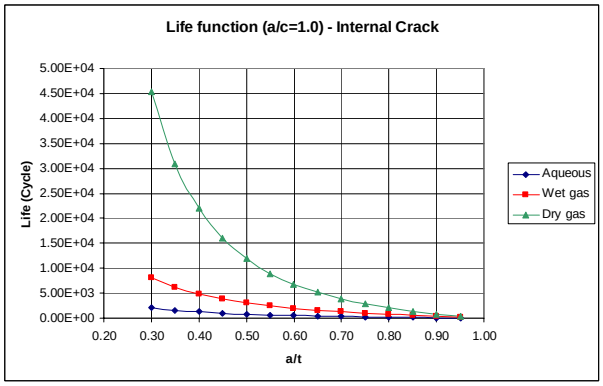
شكل ١١: تابع عمر ترك داخلي $a/c = 0.4$



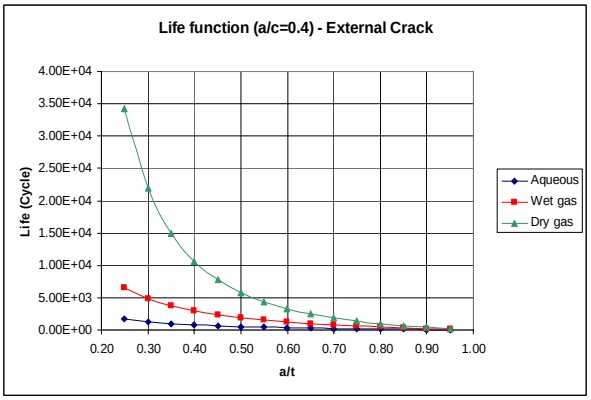
شكل ١٢: تابع عمر ترك داخلي $a/c = 0.6$



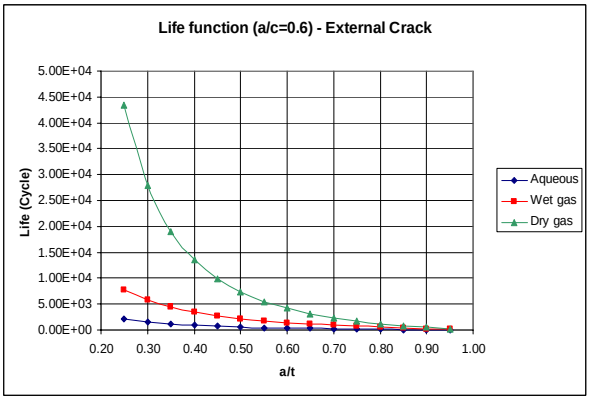
شكل ١٣: تابع عمر ترك داخلي $a/c = 0.8$



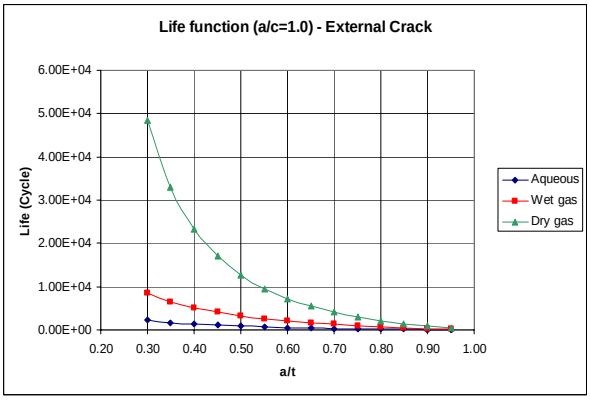
شكل ١٤: تابع عمر ترك داخلي $a/c = 1.0$



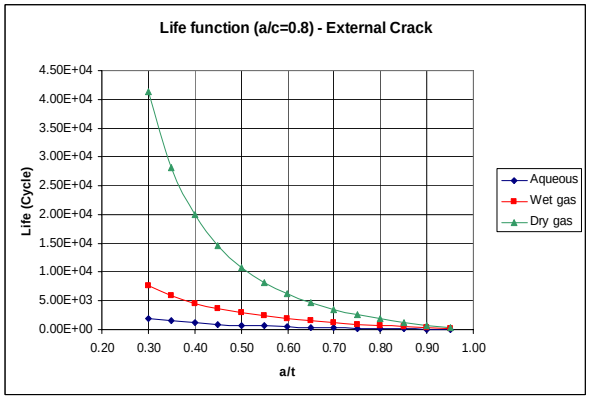
شكل ١٥: تابع عمر ترك خارجي $a/c = 0.4$



شكل ١٦: تابع عمر ترك خارجي $a/c = 0.6$

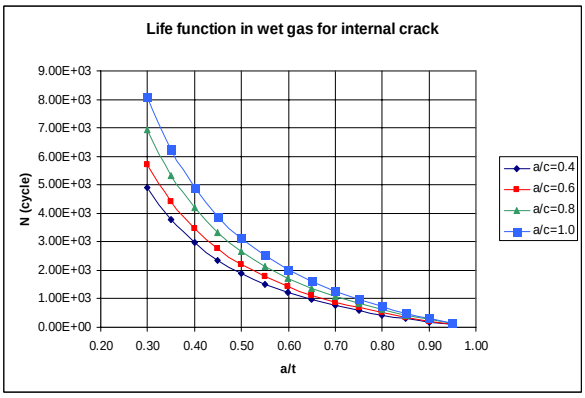


شكل ۱۷: تابع عمر ترك خارجي $a/c = 0.8$

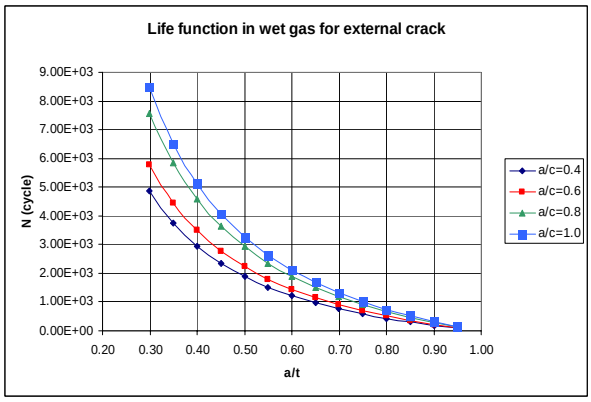


شكل ۱۸: تابع عمر ترك خارجي $a/c = 1.0$

همان‌طور كه در تمامي شكل‌هاي ۱۱ تا ۱۸ ملاحظه مي‌گردد و قابل پيش‌بيني هم بود، عمر مخزن با افزايش عمق اولية ترك، به‌صورت نمائي كاهش يافته است. نكتة جالب توجه ديگر، اختلاف محسوس عمر پيش‌بيني شده در محيط گازي خشك با مقدار عمر مخزن در محيط‌هاي آبي و گاز مرطوب است. بررسي تأثير شكل ترك (a/c) در عمر مخزن نيز در شكل‌هاي ۱۹ و ۲۰ مشخص شده‌است. اين مقايسه به‌دليل محتمل‌تر بودن محيط گاز مرطوب در مخازن تنها در اين محيط انجام پذيرفته است.



شكل ۱۹: تغييرات تابع عمر بواسطة تغيير شكل ترك داخلي

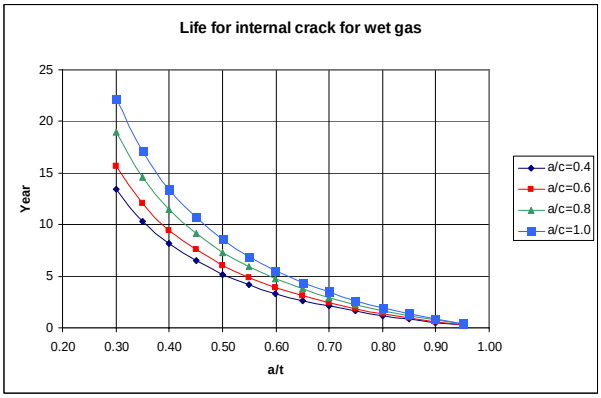


شكل ۲۰: تغييرات تابع عمر بواسطة تغيير شكل ترك خارجي

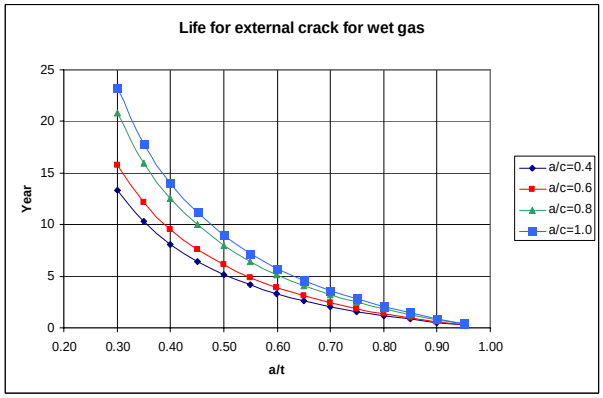
در اين دو نمودار همان‌طور كه مشاهده مي‌گردد، با افزايش نسبت a/c همگام با كاهش ضريب شدت تنش، عمر مخزن نيز افزايش يافته است. نكتة ديگر عمر بيشتر پيش‌بيني شده براي ترك خارجي نسبت به ترك داخلي با هندسة مشابه است. البته مي‌بايست توجه گردد كه مقايسة فوق براي دو محيط مشابه در نظر گرفته شده‌است، حال آنكه ميزان رطوبت داخل و خارج مخزن متفاوت است. شايد با كمي اغماض بتوان براي محيط خارج مخزن در نواحي خشك از نمودار مربوط به گاز خشك نيز استفاده كرد.

حال با توجه به بررسي انجام شده در خصوص فاصلة زماني بين دو شارژ مخزن در تاكسي‌هاي تهران، فرض مي‌شود كه مخزن در هر روز شارژ گاز شود يا به نوعي فرض مي‌شود كه مخزن در هر روز يك بار پر و خالي شود (تقريباً ۳۰۰ بار در هر سال). به اين ترتيب امكان بررسي توزيع عمر ساليانه مخزن بر حسب پارمتر مشخص كنندة عمر، a/t، امكان‌پذير خواهد بود. در اينجا تنها جهت بررسي كلي، متناظر شكل‌هاي ۱۹ و ۲۰ برحسب سال دوباره آورده شده‌است (شكل‌هاي ۲۱ و ۲۲).

همانطوريكه ملاحظه ميشود، تركهايي با عمق نصف ضخامت مخزن، هنوز عمري بيشتر از ۵ سال دارد.



شكل ۲۱: تغييرات تابع عمر بواسطة تغيير شكل ترك داخلي



شكل ۲۲: تغييرات تابع عمر بواسطة تغيير شكل ترك خارجي

۷) بررسی نتايج و جمع‌بندي

بايد جهت اطمينان خاطر از مفيد بودن نتايج ارائه شده در اين تحقيق، فرضيات محافظه‌كارانة بـه كـار رفتـه در تحليـل مكانيك شكست مخازن بار ديگر گوشزد مي‌شود: فرض ضريب شدت تنش مربوط به عمق ترك، (كه بيشتر از مقدار متناظر در لبه‌هاي ترك مي‌باشد)، براي كل ترك فرضي محتاطانه و در جهت هرچه ايمن‌تر شدن تحليل حاضر مي‌باشد. بطور خلاصه اين تحقيق مقدمه‌اي در مورد عمر ايمن مخازن CNG و رواداري آنها در برابر آسيب‌هاي احتمـالي بـود. نتـايج ارائـه شـده در ايـن تحقيق اكثراً به شكل رابطة بين اندازة اولية عمق ترك و عمر خستگي هستند كه براي كنترل كيفيـت مخـازن، بـا اسـتفاده از روش‌هاي NDT مفيد هستند. البته در عمل در بسياري مواقع اندازة ترك موجود در يك مخزن قابل اندازه‌گيري نيست. در اين مواقع جهت تعيين اندازة اولية ترك‌ها از آزمايش مقياس كامل با آب مي‌توان استفاده كرد. با تركيب اين آزمـون‌هـا بـا تحليـل مكانيك شكست و اندازه‌گيري‌هاي آزمايشگاهي مي‌توان رفتار يك مخزن CNG را در شرايط كاري آن بررسـي كـرد و سـرعت رشد ترك در آن را تعيين كرد.

۷-۱) نتيجه‌گيري

۱) با در نظر گرفتن تمهيداتي حتي در بدترين شرايط كاركرد نيز عمر خستگي بالاي ۱۵ سال براي مخازن CNG قابـل دستيابي است. اين تمهيدات عبارتند از كنترل كيفيت در طول فرآيند ساخت و خـشك كـردن گـاز مـصرفي در ايـستگاه‌هـاي سوخت‌رساني به‌منظور كاهش اثرات تخريبي ناخالصي‌ها و تركيبات خورنده موجود در آن.

۲) در محيط گازي خشك حتي با داشتن ترك‌هايي بزرگتر از حد معمول موجود در نمونه‌ها نيز مي‌توان به عمر خستگي نسبتاً طولاني (بيش از ۱۵ سال) دست يافت. (شكل‌هاي ۲۱ و ۲۲)

۳) براي ارزيابي مخازن خودروهاي گازسوز در حـين كـار اسـتفاده از روش‌هـاي آزمـون غيرمخـرب (NDT) هـم از نظـر اقتصادي و هم از نظر تكنيكي مقرون به‌صرفه است.

۴) با توجه به اهميت زياد شكست‌هاي خستگي، بايد قبل از طراحي قسمت‌هايي كه تحت بارهاي سـيكلي و يـا ناگهـاني قرار مي‌گيرند، وضعيت و نحوة رشد ترك خستگي در آنها محك زده شده و كارايي آن قسمت در تحمل بار، مورد بررسي دقيق قرار گيرد.

۵) عمر و مقاطع زماني بازبيني و تعمير و نگهداري نيز تابعي از نرخ رشد ترك خستگي مي‌باشد كه براي تعيين آنها، بايد نحوه شروع و رشد ترك خستگي معلوم شود.

مراجع

1- F. F. Lyle, H. C. Bughard, Jr., and E. P. George, “Effect of Natural Gas Quality on Corrosion of CNG Storage Cylinders-Phase I,” Final Report under Contract No. 730-FFES-FUC-85, New York State Energy Research and Development Authority, NY, February 1989.

2- F. Lyle, Jr. “Evaluation of the Effect of Natural Gas Contaminants on Corrosion in CNG Storage Systems-Phase II,” Report No. ORNL/Sub/85-22025/1, Department of Energy Contract No. DE-AC05-84OK21400, Subcontract No. 36X-22025C, Oak Ridge National Laboratory, Martin Marietta Energy Systems, Inc., Oak Ridge, TN, January 1989.

۳- كتابچة اولين همايش سوخت جايگزين CNG و خودروهاي گازسوز، ۲۷ ارديبهشت‌ماه ۱۳۸۳، تهران- مركز همايشهاي بين‌المللي صدا و سيما، سازمان بهينه سازي مصرف سوخت كشور، مؤسسة عالي پژوهشي خودرو، سوخت و محيط زيست.

٤- [٤]: تحليل مكانيك شكست مخازن سوخت NGV، قسمت اول- مخازن فولادي، مؤسسة عالي پژوهشي خودرو، سوخت و محيط زيست، ترجمة محمدرضا آباديان، خسرو اشرفي، بهمن‌ماه ۱۳۸۳.

٥- بررسي انواع خوردگي و علل آن در مخازن CNG، علي مؤمني، مجيد لطفي حقيقت، هشتمين كنگرة ملي خوردگي، دانشكدة فني دانشگاه تهران، خردادماه ۱۳۸۲.

٦- رجوع شود به [۳]، صفحة ۳۰، خط اول.

۷- مكانيك شكست و كاربرد آن در مهندسي، تأليف دكتر فرهاد جاويد راد، انتشارات صنايع هوافضا، چاپ ۱۳۸۳، صفحه ٤۰۹.

۸- كليد فولاد، سي. دبليو. وگزت، ترجمة احمد ساعتچي، حسين ادريس، انتشارات اركان، ۱۳۸٤.

9- A.Th. Diamantoudis, G.N. Labeas, “Stress intensity factors of semi-elliptical surface cracks in pressure vessels by global-local finite element methodology”, Laboratory of Technology and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, Patras 26500, Greece.

10-J. Schijve, Fatigue crack propagation, prediction and correlation, Engng, Fract. Mech., 11, pp. 197-206, 1978

11-P. C. Paris and F. Erdogan. A critical analysis of crack propagation laws, Trans. ASME, J. Basic Engng, 85, pp. 528-34, 1963.

12-S. J. Hudak, Jr., O. H. Burnside, and K. S. Chan, “Analysis of Corrosion Fatigue Crack Groth in Welded Tublar Joints,” Journal of Energy Resources Technology. Vol. 107, pp. 212-219, 1985.

13-Compressed Gas Association Pamphlet C-1, “Method for Hydrostatic Testing of Compressed Gas Cylinders,” Compressed Gas association, Inc. Arlington, VA.