

بررسی عددی تأثیر موقعیت نشت هیدروژن بر روی توزیع هیدروژن در یک محفظه بسته

محمد افغان حاجی عباس^۱، سعید خردمند^۲

kheradmand@mut.es.ac.ir

۱- کارشناس ارشد مهندسی دریا-هیدرودینامیک و جلوبری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده

ایمنی، یکی از مهمترین مسائل در مواجهه با استفاده گسترده از هیدروژن و خطر بالای ناشی از نشت آن در محیط‌های بسته می‌باشد. وجود گاز هیدروژن در چاه باتری زیردریایی‌ها نیز حادثه ساز است. یکی از راه‌های کاهش این خطر شناسایی رفتار گاز هیدروژن در شرایط مختلف می‌باشد. به همین دلیل، در این مقاله، رفتار گذرای گاز هیدروژن در نشت و پخش در یک محفظه سیلندری بسته، شبیه سازی عددی شده است. کسرهای حجمی هیدروژن در طول مدت زمان نشت ۶۰ S و همینطور تا ۱۰۰ دقیقه پس از توقف نشت، استخراج و در زمان‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ دقیقه‌ای با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. بعلاوه، بررسی‌های عددی برای پارامتر موقعیت نشت انجام شد. مطالعات نشان دادند مناطق پرخطر از نظر قابلیت اشتعال به سرعت در قسمت بالای محفظه شکل می‌گیرند و همچنین در مطالعه تأثیر ارتفاع منطقه خطر نیز این مطلب دریافت شد که با افزایش ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت، مناطق خطر وسیع‌تر گشته و ماندگاری آن نیز بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: هیدروژن، چاه باتری، موقعیت نشت، اشتعال پذیری، شبیه‌سازی عددی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۴/۰۷

۱- مقدمه

با نگرانی‌های شدیدی که در مورد منابع انرژی و محیط زیست وجود دارد، توسعه انرژی‌های تجدید پذیر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و کنترل آلودگی کمک کند [۱]. هیدروژن به دلیل عدم وجود آلوده‌کننده‌های با پایه کربنی و فراوانی در طبیعت، یکی از امیدبخش‌ترین جایگزین‌های سوخت‌های با پایه هیدروکربنی است [۲]. هیدروژن در کاربردهای دریایی نیز وجود دارد. وقتی زیردریایی در سطح آب است، موتور دیزل کار کرده و ضمن تولید قدرت پیش رانش، نیروی الکتریکی مورد نیاز داخلی و شارژ^۱ باتری‌ها را فراهم می‌کند. وقتی زیردریایی به زیر آب می‌رود، موتور دیزل از مدار تولید قدرت خارج شده و از موتور الکتریکی که به وسیله ذخیره باتری کار می‌کند، استفاده می‌شود. هم در حالت شارژ هم در حالت دشارژ^۲ باتری‌ها، هیدروژن تولید می‌شود. باتری‌ها نیازمند قرار گرفتن در یک چاهک هستند. برای جابجا کردن و خارج کردن هیدروژن باید یک سیستم تهویه طراحی شود. در جزئیات طراحی قسمت چاه باتری باید مراقب بود تا به تدریج توده‌های هیدروژن در آن شکل نگیرند. علاوه بر آن طراحان و سازندگان زیردریایی همواره به دنبال استفاده از سیستم‌های رانش مستقل از هوا بوده‌اند تا زیردریایی نیاز کمتری به آمدن به سطح آب داشته باشد. پیل سوختی یکی از آنهاست که در کنار سیستم رانش اصلی (که معمولاً دیزل-الکتریک است) به کار می‌رود. به دلیل وجود هیدروژن به عنوان سوخت [۳] و ذخیره‌سازی آن، امکان نشت در تمامی کانال‌ها و کمپارتمان‌هایی که هیدروژن در آنجا وجود دارد، هست. بنابراین سیستم تهویه، در این موارد، ضروری است؛ چرا که هیدروژن در دسته بندی گازهای به شدت اشتعال پذیر قرار می‌گیرد [۲و۴].

مطالعات بر روی نحوه پراکندگی گاز هیدروژن در یک محوطه بدون تهویه به اواخر دهه شصت میلادی باز می‌گردد [۵] که از آن جمله می‌توان به تحلیل‌های ایمنی برای استفاده از گاز طبیعی اشاره کرد [۶]. در سال ۲۰۰۸، وودوما^۳ شبیه‌سازی با جزئیات در مورد اختلاط، نشت و اشتعال پذیری گاز هیدروژن به صورت گذرا، در هندسه‌های ساده انجام دادند [۷]. کار آن‌ها به منظور دست یابی به درک

جامعی از رفتار گذرای اختلاط هیدروژن در هوا و حدود اشتعال پذیر مربوط به آن می‌باشد. در این شبیه سازی عددی با کمک ابزار سی اف دی، یک سیلندر عمودی ساده برای پیش بینی رفتار گذرای اختلاط هیدروژن، به ویژه در زمان‌های کوتاه اولیه، برای سناریوهای مختلف رهاسازی هیدروژن در نظر گرفته شده است. از این تحقیق می‌توان به عنوان یک کار مبنایی برای شناخت رفتار گذرای گاز هیدروژن در پخش در هوا و اختلاط با آن در هندسه‌های ساده استفاده کرد، مهمترین نتیجه این تحقیق این است که، زمانی که هیدروژن در بالای هوا باشد، غلظت مخلوط، تنها با موقعیت عمودی مشخص می‌گردد و وابستگی کمی به موقعیت شعاعی دارد. در سال ۲۰۰۹ آقای ونتسانوس^۴ به همراهی چندین نفر در قالب ۱۰ تیم از کشورهای مختلف کار آزمایشگاهی لی کام^۵ و همکارانش [۸] را که در آن، آزمایشی در مقیاس بزرگ بر روی پخش گاز هیدروژن در یک محفظه مکعبی شکل با حجم 80 m^3 انجام شده بود، با کدهای مختلف و با شبکه‌بندی و فرضیات متفاوت حل کرده و جواب‌ها را با هم و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند و از این طریق بهترین فرضیات و مدل‌ها را برای پیش بینی بهتر پخش هیدروژن معرفی کردند [۹].

بنابر نتایج این تحقیق می‌توان مدل‌های $k-\epsilon$ را یک مدل مناسب معرفی نمود و مشخص شد که گروه‌هایی که از مدل‌های اغتشاشی SST و $k-\epsilon$ استفاده کرده بودند دارای جواب‌های دقیق تری نسبت به اغتشاشی $k-\epsilon$ RNG هستند. در سال ۲۰۱۰، آقای ژنگ^۶ و همکارانش کار آزمایشگاهی مذکور را به صورت عددی شبیه سازی کرده و نتایج را با حل به روش تحلیلی مقایسه کردند [۱۰]. طبق نتیجه بیان شده در این مقاله، روش تحلیلی تنها برای هندسه‌های ساده، قابل کاربرد است و نیز در مقایسه با روش CFD اطلاعات کمتری به دست می‌دهد و نمی‌تواند جایگزین این روش باشد. در سال ۲۰۱۴ آقای گیانیسی^۷ به همراه چندین نفر، در قالب سه تیم با کدها و مدل‌ها و فرضیات مختلف کار آزمایشگاهی پخش گاز هلیوم، که توسط کاریتیو^۸ [۱۱] در یک فضای بسته متوازی السطوح با پایه‌ای مربعی با ابعاد $0.93 \times 0.93 \times 0.126\text{ m}$ انجام

⁵ Lacomme⁶ Zhang⁷ Giannissi⁸ Cariteau¹ Charge² De-Charge³ Vuduma⁴ Venetsanos

سیالات محاسباتی، معادله پیوستگی برای مخلوط (هوا + هیدروژن)، معادله بقای مومنتوم (معادلات ناویر استوکس) برای سرعت مخلوط و معادله بقا برای کسر جرمی هیدروژن حل می‌گردد [۱۲]. همچنین معادلات اغتشاشی $k-\varepsilon$ [۸] برای مدل سازی جریان مغشوش استفاده می‌شود. معادلهٔ بقاء جرم، یا معادله پیوستگی به صورت معادله (۱) می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه ρ معرف چگالی با واحد کیلوگرم بر متر مکعب، t زمان بر حسب ثانیه و \vec{v} بردار سرعت بر حسب متر بر ثانیه است. بقاء حرکت در یک دستگاه مرجع اینرسی که معروف به معادلات ناویر-استوکس [۱۲] است بصورت معادله (۲) ارائه می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + F \quad (2)$$

در این معادله، μ معرف لزجت دینامیکی بر حسب پاسکال ثانیه، p فشار ترمودینامیکی محلی بر حسب پاسکال و F نیرویهای خارجی بر حسب نیوتون است.

جدول (۱) ثابت‌های مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ [۱۹]

مقدار	ثابت
۱/۴۴	$C_{1\varepsilon}$
۱/۹۳	$C_{2\varepsilon}$
۰/۰۹	C_{μ}
۱/۰	σ_k
۱/۳	σ_ε

در تحقیق حاضر از عبارت $(\rho - \rho_{ref})$ با در نظر گرفتن چگالی گاز هیدروژن به عنوان چگالی مرجع، به جای مقدار ρ برای مدل کردن نیروی بویانسی توسط مدل بویانسی کامل (اختلاف چگالی) استفاده شده است. برای شبیه سازی اثر اغتشاشات در این تحقیق با توجه به پیشنهادی که در منابع [۹] و [۱۵] داده شده است، از مدل استاندارد $k-\varepsilon$ [۱۶] استفاده شده است. این مدل به عنوان یک مدل کاربردی دو معادله‌ای در شبیه سازی‌های اخیر محققان زیاد استفاده شده است [۱۸ و ۱۷]. انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف آن از روابط (۳) و (۴) بدست می‌آید:

$$\frac{\partial(\rho kt)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho kt) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_{lam} + \frac{\rho v_t}{\sigma_k} \right) \nabla kt \right] + \rho v_t G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

گرفته بود، را مدل کردند [۱۲]. مطالعات قبلی نشان داده بود که هلیوم عموماً می‌تواند به عنوان جایگزینی برای مطالعه گاز هیدروژن باشد [۱۴ و ۱۳]. طبق نتایج این تحقیق، مدل‌های $k-\varepsilon$ و LES بهتر از SST با نتایج آزمایشگاهی تطبیق یافته اند.

در این مقاله به منظور بهینه‌سازی طراحی سیستم تهویه و ایجاد راهنمایی‌هایی در مورد دفع خطر ایجاد شده از نشت و پخش گاز هیدروژن و نیز اطلاع از چگونگی پخش آن در محیط‌های بسته، مطالعه‌ای بر روی تغییر پارامتر ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت، انجام می‌گیرد. در تمامی حالات مشابه، شرایط محاسبات تا حد ممکن یکسان در نظر گرفته می‌شود تا امکان تأثیرپذیری تحلیل‌ها از روش حل از بین برود. در این مطالعه تأکید بر روی دو موضوع مهم است، یکی اینکه در زمان مشخص چه مقدار از داخل فضای بسته، منطقه پر خطر قابل اشتعال است و دیگری اینکه، این منطقه پر خطر چه هنگام از بین می‌رود.

۲- شرح مسئله

در کار حاضر هندسه‌ای شبیه به هندسه‌ای که توسط شبکو و همکارانش برای تحقیق آزمایشگاهی‌شان در نظر گرفته شده بود، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ که یک حالت کاربردی رهاسازی هیدروژن در فضای بسته را در نظر گرفته است [۱۵]. در داخل یک محفظه سیلندری شکل، هیدروژن از یک روزنه بسیار کوچک فشار بالا در سرعت فرو صوتی خارج می‌گردد. سطوح غلظت هیدروژن برای تشخیص مناطق قابل اشتعال، به منظور ارزیابی خطر و احتمال آتش سوزی مفید هستند. هندسه مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. سیلندر نام برده شده ارتفاعی برابر با ۵/۵ m و قطری برابر با ۲/۲ m و حجمی برابر با $20/046 \text{ m}^3$ دارد (شکل (۱)) و در لحظات اولیه، با هوای ساکن که دمای اولیه آن 20°C و فشار اولیه آن Pa 101325 می‌باشد، پر شده است. هیدروژن با سرعت (m/s) $57/3$ در طول مدت ۶۰ s به داخل محفظه تزریق می‌شود. قطر لوله تزریق ۱۰ mm بوده و بر محور سیلندر و ۱/۴ پایین‌تر از سقف سیلندر واقع شده است.

۳- معادلات حاکم

به منظور شبیه سازی جریان سیال با روش دینامیک

$$\frac{\partial(Cx_A)}{\partial t} + \frac{\partial(Cux_A)}{\partial x} + \frac{\partial(Cvx_A)}{\partial y} + \frac{\partial(Cwz_A)}{\partial z} = \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial z} \right) \right]$$

که در آن u, v, w به ترتیب سرعت‌های خطی سیال در راستای x, y و z می‌باشند.

برای تشخیص اهمیت نیروی بویانسی در مناطق مختلف بالای حفره نشت از مقیاس مورتون استفاده شده است [۹]. بر اساس این مقیاس جریان جت ناشی از نشت گاز ۱ درون گاز ۲ به طوری که گاز ۱ سبک‌تر از گاز ۲ باشد، می‌تواند به سه ناحیه تقسیم‌بندی گردد:

الف) ناحیه جت غیر بویانسی

$$\frac{Z}{L_{Mo}} \leq 0.15 \quad (10)$$

ب) ناحیه جت بویانسی

$$0.15 \leq \frac{Z}{L_{Mo}} \leq 5 \quad (11)$$

ج) ناحیه کاملاً بویانسی

$$\delta \leq \frac{Z}{L_{Mo}} \quad (12)$$

که در آن Z ارتفاع عمودی از حفره نشت بر حسب متر و L_{Mo} مقیاس اندازه مورتون بر حسب متر می‌باشد که از رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آید:

$$L_{Mo} = F^{\frac{1}{2}} \times \omega^{\frac{1}{2}} \times d \quad (13)$$

در جایی که:

$$F = \frac{\rho_1 \times U_1^2}{(\rho_2 - \rho_1) \times g \times d} \quad (14)$$

$$\omega = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (15)$$

که ρ_1 و ρ_2 به ترتیب چگالی گازهای ۱ و ۲ بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، U_1 سرعت گاز ۱ در خروجی بر حسب متر بر ثانیه، g شتاب ثقلی زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه و d قطر خروجی بر حسب متر می‌باشند.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- اعتبار سنجی روش حل

هندسده سیلندری به منظور کاهش هزینه محاسبات به صورت تقارن محوری و دو بعدی حل شده است. نامگذاری سطوح و شرایط مرزی مربوط به آن در شکل (۲) مشخص

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_{lam} + \frac{\rho \nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] \quad (4)$$

$$+ C_{1\varepsilon} \rho \nu_t G \frac{\varepsilon}{kt} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{kt}$$

در این روابط، kt انرژی جنبشی اغتشاشی بر حسب $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ ، عبارت کلموگراف-پرانتل، G نرخ تولید اغتشاش بر حسب $\left(\frac{kg}{ms^3}\right)$ ، ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی بر حسب $\left(\frac{m^2}{s^3}\right)$ است. مقدار ثابت‌های این مدل در جدول (۱) آمده است.

در تحقیق حاضر به منظور شبیه سازی نفوذ ملکولی از قانون فیک استفاده شده است. این قانون شار انتقال جرم ناشی از نفوذ ملکولی را به گرادیان غلظت بدون بعد مربوط

می‌کند [۲۰]. برای نفوذ یک بعدی ماده A در یک مخلوط دو جزیبی A و B طبق قانون فیک داریم:

$$J_A = -C \times D_{AB} \times \frac{\partial x_A}{\partial Z} \quad (5)$$

که در آن J_A ، شار انتقال جرم (جرم ماده انتقال یافته در واحد زمان از واحد سطح عمود بر جهت جریان انتقال جرم)، ناشی از نفوذ ملکولی بر حسب $\left(\frac{mol}{s.m^2}\right)$ ، C ، غلظت کل مخلوط می‌باشد که برابر است با تعداد مول‌ها در واحد حجم مخلوط:

$$C = \sum^n C_i \left(\frac{mol}{m^3} \right) \quad (6)$$

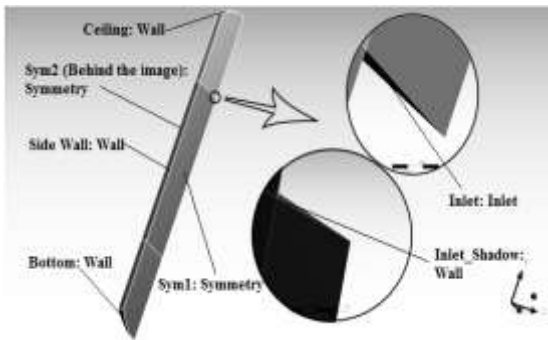
و C_i عبارت است از غلظت مولی جزء i که برابر است با تعداد مول‌ها در واحد حجم مخلوط:

$$C_i = \frac{n_i}{V} \left(\frac{mol}{m^3} \right) \quad (7)$$

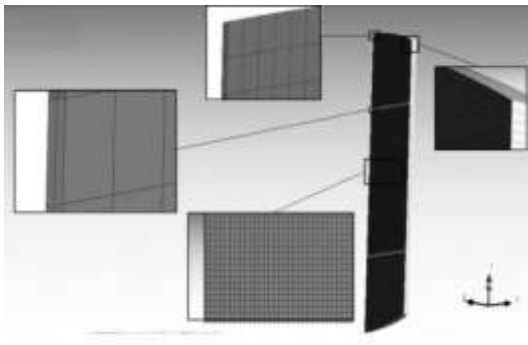
D_{AB} ، دیفیوزیویته یا ضریب نفوذ جز A در مخلوط شامل A و B است و تابعی از دما، فشار، غلظت و جنس اجزاء مخلوط است $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ ، گرادیان کسر مولی A در جهت Z می‌باشد بر حسب $\left(\frac{1}{m}\right)$ که کسر مولی A ، برابر است با غلظت مولی جزء i به غلظت مولی کل مخلوط که طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$x_i = \frac{C_i}{C} \quad (8)$$

و اما از آنجایی که در تحقیق حاضر از حجم کنترل محدود برای گسسته سازی میدان حل استفاده شده است، قانون بقای جرم گونه‌ها برای حجم کنترل محدود بدون واکنش شیمیایی به صورت معادله (۹) تعریف می‌شود:



شکل (۲) شرایط مرزی تعریف شده برای مدل سازی.



شکل (۳) شبکه بندی انجام شده بر روی هندسه تقارن محوری سیلندر مورد مطالعه.

برای شبیه‌سازی پخش هیدروژن، یک ماده مخلوط با ترکیب متغیر با اجزای هوا و هیدروژن در قلمرو حل، تعریف شده است. میدان حل از نظر ریخت شناسی^۶ به صورت سیال پیوسته^۷ در نظر گرفته شده است. مدل بویانسی کامل با شتاب g - در راستای محور y فعال شده است. از آنجایی که در مدل آزمایشگاهی هیچ اطلاعاتی از تغییر دمای دیواره‌ها داده نشده است، کل محیط به صورت هم دما^۸ در نظر گرفته شده است. در نهایت به منظور شبیه‌سازی پخش هیدروژن از مدل‌های جزئی^۹ با در نظر گرفتن هوا به صورت مقید^{۱۰} و در نظر گرفتن گاز هیدروژن برای حل معادله انتقال^{۱۱} و با ضریب نفوذ (پخش)^{۱۲} $\left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right)$ که از مطالعه مقالات و اعتبار سنجی با نتایج آزمایشی به دست آمده، استفاده شده است.

شده است. صفحات در راستای y (به جز دیواره کناری) به صورت متقارن^۱ تعریف گشته است. در قسمت ورودی هیدروژن برای مشخص کردن نشت رو به بالا برای نرم افزار، سطح اتصال بالایی را با شرط مرزی ورودی و سطح اتصال پایینی را با شرط مرزی دیوار مشخص می‌کنیم.

هندسه به صورت نیمی از مقطع عمودی سیلندر به عرض $1/1$ m (در راستای محور x) و ارتفاع $5/5$ m در راستای محور y تولید شده که حول محور سیلندر (در راستای محور y) به اندازه 5° چرخانده^۲ شده است. هندسه در راستای y به سه قسمت و به صورت متقارن و در راستای x به دو قسمت و به صورت سرتاسری (به منظور تعیین محل نشت و نیز بالا بردن کیفیت مش بندی)، تقسیم‌بندی شده است. برای مش زدن الگوی مش بر روی سطح $Sym1$ ایجاد شده و با جاروب کردن^۳ در راستای زاویه ای کل هندسه را شبکه بندی می‌کنیم. در حالت‌های مختلف مطرح در این مقاله، از آنجایی که تنها اختلاف در مکان عمودی قرار گیری حفره نشت می‌باشد، روش شبکه بندی در تمامی حالات یکسان است و تنها تقسیم بندی‌های عمودی اندکی تغییر می‌کند. تعداد کل المان‌ها در این شبکه بندی 20684 عدد می‌باشد (شکل (۳)).

جریان را از نظر بازه زمانی به دو قسمت تقسیم می‌کنیم، جریان در طول مدت 60 s هیدروژن (فاز رهاسازی^۴) و جریان بعد از قطع نشت (فاز پخش^۵). عدد ماخ در این مسئله برابر با $0/3 < 0/167$ می‌باشد بنابراین با توجه به طبقه بندی تقریبی ارائه شده در [۲۵]، جریان در این شبیه‌سازی جزء جریان‌های تراکم ناپذیر قرار می‌گیرد اما با توجه به اینکه در این محفظه تنها ورودی هیدروژن داریم و محفظه خروجی ندارد واضح است که این گاز هیدروژن اضافی موجب افزایش چگالی می‌شود ولی با توجه به اینکه گاز هیدروژن در طول مدت 60 ثانیه ای تنها در حدود $0/4\%$ موجب افزایش چگالی می‌شود، می‌توان چگالی را در طول مدت رهاسازی ثابت در نظر گرفت و پس از پایان یافتن نشت نیز واضح است که جریان تراکم ناپذیر است.

7 Continues Fluid

8 Isothermal

9 Component model

10 Constraint

11 Transport equation

12 Kinematic diffusivity

1 Symmetric

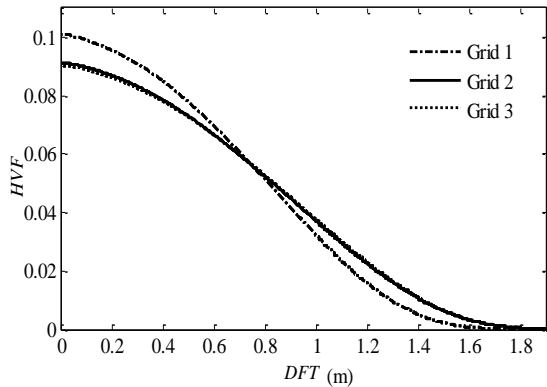
2 Revolve

3 Sweep

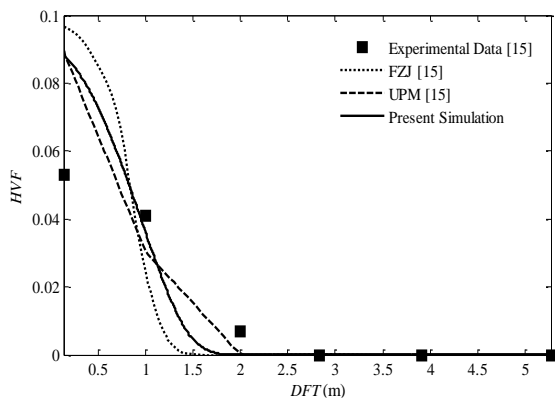
4 Release Phase

5 Diffusion Phase

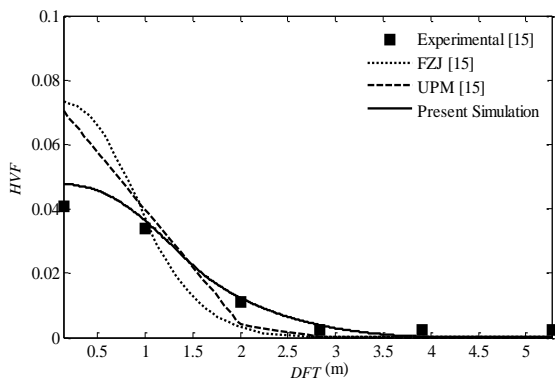
6 Morphology



شکل (۴) نمودار حاصل از انجام محاسبات با سه نوع شبکه بندی.



شکل (۵) نمودارهای کسر حجمی هیدروژن حاصل از شبیه سازی و مقایسه آن با مقادیر آزمایشگاهی و دو شبیه سازی دیگر که توسط دو تیم [۱۵] UPM و [۱۵] FZJ انجام گرفته است (۲ دقیقه پس از پایان نشت).



شکل (۶) نمودارهای کسر حجمی هیدروژن حاصل از شبیه سازی و مقایسه آن با مقادیر آزمایشگاهی و دو شبیه سازی دیگر که توسط دو تیم [۱۵] UPM و [۱۵] FZJ انجام گرفته است (۵۰ دقیقه پس از پایان نشت).

از زمان ۰s تا ۶۰s نشت هیدروژن وجود دارد، در لحظه صفر تنها هوای ساکن در سیلندر وجود دارد و هیدروژن با سرعت $57/3 \left(\frac{m}{s}\right)$ به صورت عمودی و رو به بالا نشت پیدا میکند. گام های زمانی در این مرحله ۰/۱ s در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم نشت هیدروژن متوقف گشته و تا زمان دلخواه مسئله ادامه می یابد. برای شبیه سازی در این مرحله سرعت هیدروژن را در ورودی $\left(\frac{m}{s}\right)$ ، قرار می دهیم و به منظور مقاداردهی اولیه میدان جریان از جواب مسئله در پایان ۶۰s استفاده می کنیم. در ۱۲۰ ثانیه اول پس از توقف نشت به دلیل تغییرات شدید میدان به منظور کاهش هزینه انجام محاسبات و نیز از دست نرفتن دقت مورد نیاز (معیار همگرایی 10^{-4} در نظر گرفته شده است) گام زمانی به صورت انطباقی با عدد کورانت بیشینه و حداقل ۰/۰۱ و حداکثر ۰/۱ و با اولین زمان به روزرسانی ۰/۰۰۳ ثانیه در نظر گرفته شده است و برای زمان های بعدی گام زمانی ۰/۵ s در نظر گرفته شده است.

برای ایجاد شرایط استقلال از شبکه بندی، شبکه بندی هایی با مقادیر نزدیک به نسبت های n ، $0/5n$ و $2n$ انجام گرفت (جدول ۲) و شبیه سازی با هر ۳ شبکه بندی ۲ تا ۲ دقیقه پس از پایان نشت هیدروژن انجام شد. لازم به ذکر است که در نمودارها، HVF^1 کسر حجمی هیدروژن، DFT^2 فاصله از سقف بر حسب متر، HRH^3 ارتفاع منطقه خطر بر حسب متر و RHH^4 ارتفاع محل قرار گیری حفره نشت بر حسب متر را نشان می دهند.

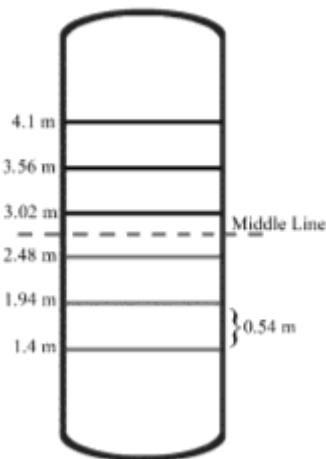
همانطور که از نمودار شکل (۴) مشخص است بین Grid ۱ و Grid ۲ اختلاف نسبتاً زیادی وجود دارد، اما این اختلاف بین Grid ۲ و Grid ۳ ناچیز به نظر می رسد. بنابراین انتخاب Grid ۳ ضمن افزایش هزینه های محاسبات مزیتی نسبت به انتخاب Grid ۲ ندارد. برای اعتبار سنجی روش عددی به کار گرفته شده، مدل شبکو در طول ۱۰۰ دقیقه به صورت گذرا شبیه سازی شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده اند. در نمودارهای شکل های (۵) تا (۷) کسرهای حجمی هیدروژن به دست آمده از انجام محاسبات شبیه سازی با مقادیر مشابه تجربی و دو شبیه سازی مشابه که توسط دو تیم [۱۵] UPM و [۱۵] FZJ انجام گرفته، اعتبار سنجی شده است.

³ Hazard Region Height

⁴ Release Hole Height

¹ Hydrogen Volume Fraction

² Distance From Top



شکل (۸) ارتفاع‌های نشت مختلف در سیلندر مورد مطالعه.

ارتفاع حفره نشت با پارامتر RHH نشان داده شده است. برای قابل درک شدن مقایسه بین فواصل و مطالعه ساده-تر، یک پارامتر بی بعد به نام RHH* به صورت زیر تعریف شده است:

$$RHH^* = \frac{RHH \text{ (m)} - 0.86 \text{ (m)}}{0.54 \text{ (m)}} \quad (16)$$

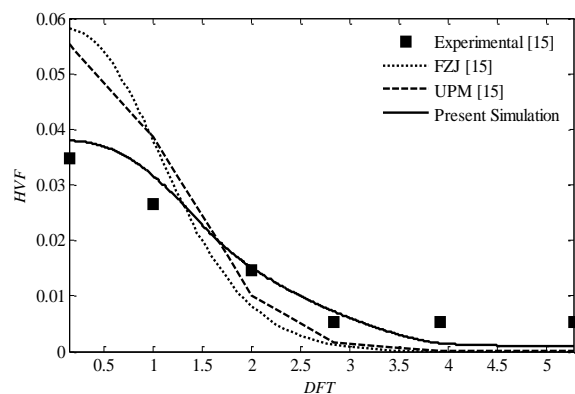
بدین ترتیب RHH* در ارتفاع‌های مختلف به ترتیب برابر با ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ می‌شوند. به جز ارتفاع نشت که پارامتر مورد بررسی است، برای سایر مشخصات از همان مشخصات نشت اصلی و نیز در تمامی موارد از هندسه اصلی استفاده شده است. همانطور که در شکل (۹) پیداست در زمان کوتاه ۲ دقیقه پس از پایان یافتن نشت هیدروژن، با افزایش ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت نمودار کسر حجمی هیدروژن نیز بیشتر در بالای محفظه تمرکز پیدا می‌کند که این امر باعث بالا رفتن بیشینه‌های کسر حجمی هیدروژن در بالا رفتن ارتفاع نشت می‌گردد.

جدول (۲) مشخصات مش بندی در سه حالت مختلف برای انجام محاسبات مربوط به استقلال از شبکه.

شبکه بندی	تعداد گره	تعداد المان
Grid ۳	۹۵۵۵۹	۴۷۴۰۰
Grid ۲	۴۶۶۵۵	۲۳۱۰۰
Grid ۱	۲۲۵۷۵	۱۱۱۰۰

۲-۴- مطالعه پارامتری

پارامتری که به بررسی تأثیر آن بر روی چگونگی پخش هیدروژن، ارتفاع منطقه خطر به وجود آمده و زمان از بین رفتن منطقه خطر می‌پردازیم، موقعیت نشت در طول محور محفظه سیلندر می‌باشد. فاصله بین ارتفاع‌های مختلف به صورت مساوی و به اندازه ۰/۵۴ m است، سه ارتفاع اول در نیمه پایینی محفظه و سه ارتفاع دوم در نیمه بالایی آن قرار دارند (شکل (۸)).

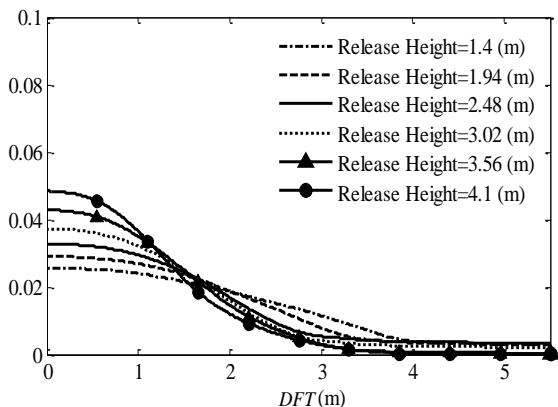


شکل (۷) نمودارهای کسر حجمی هیدروژن حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه آن با مقادیر آزمایشگاهی و دو شبیه‌سازی دیگر که توسط دو تیم [UPM15] و [FZJ15] انجام گرفته است (۱۰۰ دقیقه پس از پایان نشت).

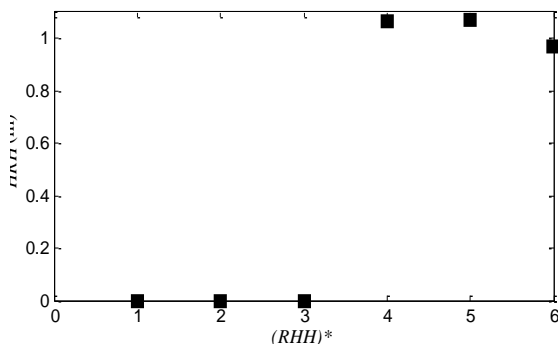
جدول (۳) مشخصات حالت‌های مختلف در مطالعه ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت.

ارتفاع نشت (m)	V (m/s)	LMO (m)	ارتفاع جت غیر بویانسی (m)	ارتفاع جت بویانسی (m)	مختصات Y آخرین نقطه تحت تأثیر جت غیر بویانسی (m)	مختصات Y آخرین نقطه تحت تأثیر جت بویانسی (m)	ارتفاع منطقه کاملاً بویانسی (m)
۱/۴۰۰	۵۷/۳	۰/۲۷۵	۰/۱۳۸	۱/۲۳۹	۱/۵۳۸	۲/۷۷۷	۲/۷۲۳
۱/۹۴۰	۵۷/۳	۰/۲۷۵	۰/۱۳۸	۱/۲۳۹	۲/۰۷۸	۳/۳۱۷	۲/۱۸۳
۲/۴۸۰	۵۷/۳	۰/۲۷۵	۰/۱۳۸	۱/۲۳۹	۲/۶۱۸	۳/۸۵۷	۱/۶۴۳
۳/۰۲۰	۵۷/۳	۰/۲۷۵	۰/۱۳۸	۱/۲۳۹	۳/۱۵۸	۴/۳۹۷	۱/۱۰۳
۳/۵۶۰	۵۷/۳	۰/۲۷۵	۰/۱۳۸	۱/۲۳۹	۳/۶۹۸	۴/۹۳۷	۰/۵۶۳
۴/۱۰۰	۵۷/۳	۰/۲۷۵	۰/۱۳۸	۱/۲۳۹	۴/۲۳۸	۵/۴۷۷	۰/۰۲۳

با گذر از نیمه پایین محفظه و قرار گرفتن حفره نشت در نیمه بالایی، کسر حجمی هیدروژن از ۰/۴ تجاوز کرده و باعث به وجود آمدن مناطقی پر خطر می‌شود و ملاحظه می‌گردد که با مشخصات نشت اصلی اگر هیدروژن در نیمه پایینی محفظه اصلی نشت پیدا کند، هیچ گونه منطقه خطرناکی به وجود نمی‌آید. روند موجود در تغییرات نمودارهای HVF را می‌توان اینگونه توضیح داد که در پخش هیدروژن در داخل محیط بسته ساکن و هم دما سه عامل مهم است: اول نیروی مومنتوم ناشی از نشت گاز به درون محفظه، دوم نیروی بویانسی ناشی از اختلاف چگالی هیدروژن و هوا و سوم پخش ملکولی گاز هیدروژن در هوا ناشی از تفاوت در غلظت. در ابتدا نیروی نسبتاً بزرگ مومنتوم، گاز را به سمت بالایی محفظه می‌راند. نیروی بویانسی ضمن اینکه به این کار کمک می‌کند، مانع از بازگشت گاز به قسمتهای پایینی محفظه نیز می‌گردد، واضح است که هرچه محل نشت گاز به سقف نزدیک‌تر باشد، نیروی مومنتوم در ارتفاعهای بالاتری عمل می‌کند و مقدار بیشتری از هیدروژن را در زمان کمتری به بالایی محفظه انتقال می‌دهد. برای روشن‌تر شدن موضوع بهتر است نگاهی به مناطق اهمیت بویانسی در جدول (۳) داشته باشیم. همانطور که در جدول مشخص است از آنجایی که طول جت‌های بویانسی و غیر بویانسی با هم برابر است و تنها در محل شروع با هم تفاوت دارند، با افزایش ارتفاع نشت این جت‌ها در ارتفاعهای بالاتری عمل می‌کنند و میرایی نیروی مومنتوم در ارتفاعهای بالاتری اتفاق می‌افتد.



شکل (۱۰) نمودارهای کسر حجمی هیدروژن ۵۰ دقیقه پس از پایان یافتن رهاسازی هیدروژن (پارامتر مورد مطالعه: ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت).

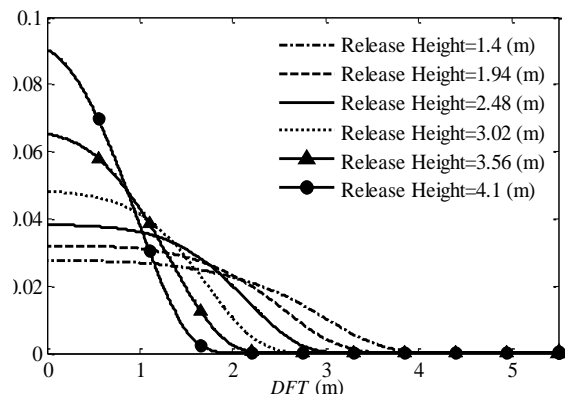


شکل (۱۱) ارتفاع منطقه خطر ۲ دقیقه پس از پایان نشت (پارامتر مورد مطالعه: ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت).

روند موجود در تغییرات نمودارهای HVF را می‌توان اینگونه توضیح داد که در پخش هیدروژن در داخل محیط بسته ساکن و هم دما سه عامل مهم است: اول نیروی مومنتوم ناشی از نشت گاز به درون محفظه، دوم نیروی بویانسی ناشی از اختلاف چگالی هیدروژن و هوا و سوم پخش ملکولی گاز هیدروژن در هوا ناشی از تفاوت در غلظت. در ابتدا نیروی نسبتاً بزرگ مومنتوم، گاز را به سمت بالایی محفظه می‌راند.

نیروی بویانسی ضمن اینکه به این کار کمک می‌کند، مانع از بازگشت گاز به قسمتهای پایینی محفظه نیز می‌گردد، واضح است که هرچه محل نشت گاز به سقف نزدیک‌تر باشد، نیروی مومنتوم در ارتفاعهای بالاتری عمل می‌کند و مقدار بیشتری از هیدروژن را در زمان کمتری به بالایی محفظه انتقال می‌دهد. برای روشن‌تر شدن موضوع بهتر است نگاهی به مناطق اهمیت بویانسی در جدول (۳) داشته باشیم.

همانطور که در جدول مشخص است از آنجایی که طول جت‌های بویانسی و غیر بویانسی با هم برابر است و تنها در محل شروع با هم تفاوت دارند، با افزایش ارتفاع نشت این جت‌ها در ارتفاعهای بالاتری عمل می‌کنند و میرایی نیروی مومنتوم در ارتفاعهای بالاتری اتفاق می‌افتد.



شکل (۹) نمودارهای کسر حجمی هیدروژن ۲ دقیقه پس از پایان یافتن رهاسازی هیدروژن (پارامتر مورد مطالعه: ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت).

مکان‌هایی که احتمال نشست دارند از $RHH^*=4$ به $RHH^*=5$ خطرناک است. پس از گذشت مدت زمان ۱۰۰ دقیقه‌ای از پایان یافتن رهاسازی هیدروژن، منطقه خطر در هیچ حالتی وجود ندارد. اما شاید پراهمیت‌ترین پارامتر مورد بررسی، زمان از بین رفتن منطقه خطر باشد که می‌توان با استفاده از این پارامتر مقایسه بهتری بین حالت‌های مختلف انجام داد و خطرناک‌ترین و کم‌خطرترین حالات را پیشنهاد داد.

همانطور که از شکل (۱۴) قابل ملاحظه است اگر $RHH^*=2,1$ و $RHH^*=3$ باشد، یعنی در نیمه پایینی محفظه، قرار داشته باشیم منطقه خطر در مدت زمان‌های کوتاه پس از پایان یافتن رهاسازی هیدروژن و حداکثر ظرف $15/55s$ از بین می‌رود، اما با قرار گرفتن در $RHH^*=5,4$ و $RHH^*=6$ ، یعنی در نیمه بالایی محفظه، زمان از بین رفتن منطقه خطر به سرعت رشد می‌کند؛ به طوری که در $RHH^*=6$ ، زمان از بین رفتن منطقه خطر $5363/55s$ (حدود ۹۰ دقیقه) به طول می‌انجامد که دلیل آن تمرکز نسبتاً بالای هیدروژن در محدوده نسبتاً کوچک بالای محفظه می‌باشد، چرا که در این حالت لایه‌های غلیظ‌تری وجود دارد و برای رقیق شدن (که تنها به واسطه فرآیند کند پخش ملکولی صورت می‌پذیرد) تا زیر کسر حجمی $0/04$ مدت زمان بیشتری نیاز است.

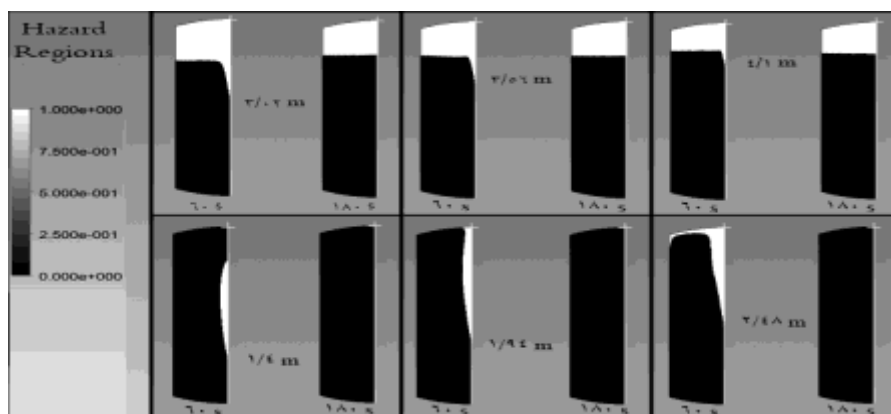
در شکل (۱۲) کانتورهای مناطق خطرناک از نظر اشتعال پذیری ($0/75 < HVF < 0/04$) دقیقاً در پایان نشست هیدروژن و زمان دو دقیقه پس از پایان نشست هیدروژن و در ارتفاع‌های نشست مورد مطالعه، آورده شده است.

طبق نمودارهای شکل (۹) با افزایش ارتفاع نشست اختلاف غلظت بین قسمت‌های پایینی و بالایی محفظه بیشتر می‌گردد که، باعث افزایش سرعت پخش ملکولی می‌گردد. این به معنای افزایش سرعت انتقال گاز هیدروژن از قسمت‌های بالایی به قسمت‌های پایینی محفظه است. به عبارت دیگر نمودارهای با پراکندگی غلظت بالاتر سریعتر از نمودارهای با پراکندگی غلظت پایین‌تر به حالت غلظت یکنواخت نزدیک می‌گردند و در نتیجه در کل نمودارهای HVF پس از گذشت زمان نسبتاً طولانی ۵۰ دقیقه‌ای به هم نزدیکتر می‌شوند.

پس از گذشت مدت زمان کوتاه دو دقیقه‌ای از توقف نشست از شکل (۱۱) قابل مشاهده است که از نظر ارتفاع منطقه خطر، حالت نشست با $RHH^*=5$ بدترین حالت، از نظر محل قرارگیری حفره نشست است. تأکید بر این نکته نیز لازم است که با قرار گرفتن حفره نشست در نیمه پایینی محفظه، دیگر هیچ منطقه خطری وجود ندارد و پس از عبور از نیمه پایینی ارتفاع منطقه خطر به حدود ۱m می‌رسد.

در شکل (۱۳) می‌توان مشاهده نمود که پس از گذشت مدت زمان ۵۰ دقیقه‌ای با قرار گرفتن حفره نشست تا $RHH^*=4$ منطقه خطری وجود ندارد و این نیز قابل ملاحظه است که $RHH^*=6$ بیشترین ارتفاع منطقه خطر را دارد که مقدار آن $0/845 m$ است.

نکته دیگری که از این نمودار بر می‌آید این است که پس از گذشت مدت زمان ۵۰ دقیقه‌ای، بین حالت‌های $RHH^*=5$ و $RHH^*=4$ بیشینه اختلاف ارتفاع منطقه خطر را دارد و تغییر از $RHH^*=4$ به $RHH^*=5$ بیشترین افزایش منطقه خطر را موجب می‌شود و به عبارتی انتقال



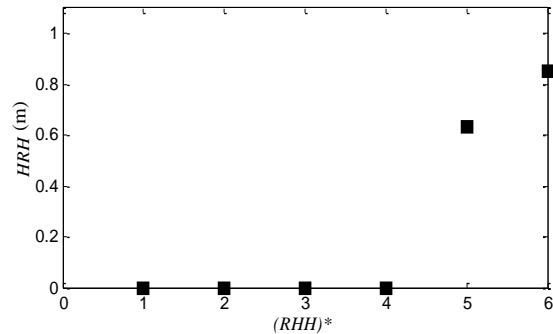
شکل (۱۲) کانتورهای منطقه خطرناک ($0/75 < HVF < 0/04$) در ارتفاع‌های نشست مورد مطالعه و زمان‌های دقیقاً در پایان نشست و دو دقیقه پس از پایان نشست.

اما با قرار گرفتن در نیمه بالایی محفظه، زمان از بین رفتن منطقه خطر به سرعت رشد می‌کند؛ به طوری که در $RHH^*=6$ ، بدترین حالت ممکن وجود دارد و زمان از بین رفتن منطقه خطر $5363/55s$ (حدود ۹۰ دقیقه) به طول می‌انجامد.

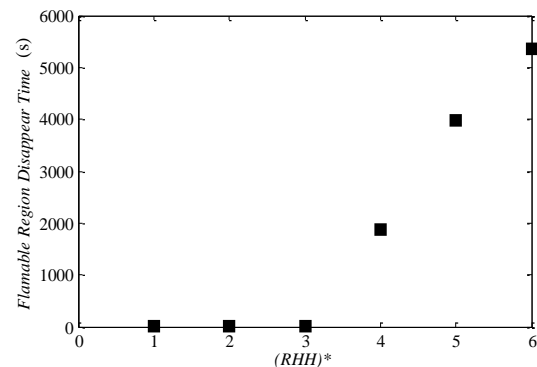
به طور کلی می‌توان گفت که افزایش ارتفاع محل قرار گیری حفره نشت نامطلوب است و طراح باید در نظر داشته باشد که محل‌هایی که احتمال نشت از آنها می‌باشد (مانند اتصالات بین کانال‌های تهویه مستقیم هیدروژن از سر باتری‌ها و محل اتصال کانال‌ها به یکدیگر و یا درز جوشکاری کانال‌ها)، نباید در ارتفاع‌های بالا قرار بگیرند. با توجه به عدم رشد خطی خطر بر اثر افزایش ارتفاع محل نشت، در صورت قرار گرفتن این محل‌ها در ارتفاع‌های بالایی طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که محل محتمل نشت در ارتفاعی قرار نگیرد که افزایش به آن، باعث افزایش بسیار زیاد خطر شود. مثلاً برای این محفظه خاص طراح باید بین $RHH^*=4$ و $RHH^*=5$ حتماً $RHH^*=4$ را انتخاب نماید.

۶- مراجع

- [1] Dunn, S., "Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System", International Journal of Hydrogen Energy. Vol.27, No.3, pp.235-264, 2002.
- [2] Dahoe, A., and Molkov, V., "On the Development of an International Curriculum on Hydrogen Safety Engineering and its Implementation into Educational Programs", International Journal of Hydrogen Energy. Vol.32, No.8, pp.1113-1120, 2007.
- [3] Larminie, J., Dicks, A., and McDonald, M. S., "Fuel Cell Systems Explained", Wiley New York, 2003.
- [4] Burcher, R., and Rydill, L.J., "Concepts in Submarine Design", Cambridge University Press, 1995.
- [5] Baines, W., and Turner, J., "Turbulent Buoyant Convection from a Source in a Confined Region", Journal of Fluid Mechanics, Vol.37, No.1, pp.51-80, 1969.
- [6] Cleaver, R., Marshal, M., and Linden, P., "The Build-up of Concentration within a Single Enclosed Volume Following a Release of Natural Gas", Journal of Hazardous Materials, Vol.36, No.3, pp.209-226, 1994.
- [7] Vudumu, S.K., and Koylu, U.O., "Detailed Simulations of the Transient Hydrogen Mixing, Leakage and Flammability in Air in Simple Geometries", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.6, pp.2824-2833, 2009.
- [8] Lacome, J.M., Jamois, D., Perrette, L., and Proust, C., "Large-scale Hydrogen Release in an Isothermal Confined Area", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.36, No.3, pp.2302-2312, 2011.



شکل (۱۳) ارتفاع منطقه خطر ۵۰ دقیقه پس از پایان یافتن نشت (پارامتر مورد مطالعه: ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت).



شکل (۱۴) زمان از بین رفتن منطقه خطر (پارامتر مورد مطالعه: ارتفاع محل قرارگیری حفره نشت).

۵- نتیجه‌گیری

با گذشت زمان نمودارهای کسر حجمی مربوط به ارتفاع‌های نشت مختلف به هم نزدیک‌تر می‌شوند و وابستگی کمتری نسبت به ارتفاع نشت پیدا می‌کنند. بنابر مطالعه ارتفاع منطقه خطر اگر مدت زمان کوتاه پس از پایان یافتن رهاسازی هیدروژن حائز اهمیت باشد، مثلاً دستگاه‌هایی داشته باشیم که در همین مدت کوتاه دچار اختلال در کارکرد شوند و یا باعث ایجاد جرقه و خطر اشتعال گردند، نباید در فاصله $1/07m$ (البته با احتساب ضریب اطمینان مورد نظر) نصب شوند و اگر چاره‌ای جز نصب آن‌ها در این محدوده نبود، بهتر است از نشت در نیمه بالایی محفظه به ویژه در ارتفاع $3/56$ با اندیشیدن تمهیدات ایمنی بیشتر جلوگیری شود؛ برای مثال، کانال‌های مورد استفاده برای تهویه گاز هیدروژن حتی‌الامکان از کف محفظه عبور کنند تا از احتمال نشت از قسمت‌های بالایی محفظه جلوگیری شود. اگر در نیمه پایینی محفظه، قرار داشته باشیم منطقه خطر در مدت زمان‌های بسیار کوتاه پس از پایان یافتن رهاسازی هیدروژن و حداکثر ظرف $115/55s$ از بین می‌رود،

- [9] Venetsanos, A., Papanikolaou, E., Delichatsios, M., Garcia, J., Hansen, O., Heitsch, M., Huser, A., Jahn, W., Jordan, T., and Lacombe, J.M. "An Inter-Comparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict the Short and Long Term Distribution and Mixing of Hydrogen in a Garage", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34, No.14, pp.5912-5923, 2009.
- [10] Zhang, J., Delichatsios, M., and Venetsanos A. "Numerical Studies of Dispersion and Flammable Volume of Hydrogen in Enclosures", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No.12, pp.6431-6437, 2010.
- [11] Cariteau, B., and Tkatschenko, I., "Experimental Study of the Effects of Vent Geometry on the Dispersion of a Buoyant Gas in a Small Enclosure", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.38, No.19, pp.8030-8038, 2013.
- [12] Giannissi, S., Shentsov, V., Melideo, D., Cariteau, B., Baraldi, D., Venetsanos, A., and Molkov, V., "CFD Benchmark on Hydrogen Release and Dispersion in Confined, Naturally Ventilated Space with one Vent", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.40, No.5, pp.2415-2429, 2015.
- [13] Swain, M.R., Grilliot, E.S., and Swain, M.N., "Risks Incurred by Hydrogen Escaping from Containers and Conduits", *Proceedings of the 1998 U.S. DOE hydrogen program review*, NREL/CP-570-25315, 1998.
- [14] Swain, M. R., Grilliot, E.S., Swain, M.N., "Dispersion of Hydrogen Clouds", *Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review*, NREL/CP-570-28890, 2000.
- [15] Gallegoa, E., Migoyaa, E., Martín-Valdepeñasa, J.M., Crespoa, A., Garcíaa, J., Venetsanos, A., Papanikolaoub, E., Kumarc, S., Studerd, E., Dagbae, Y., Jordand, T., Jahng, W., HZiseth, S. Makarovi, D., and Piechnaj, J., "An Inter-comparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict Distribution and Mixing of H₂ in a Closed Vessel", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.32, No.14, pp.2235-2245, 2007.
- [16] Launder, B. E., Spalding, D. B. "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", 1972.
- [17] Yan, L., ZHAO, P.F., Qiang, W., and CHEN, Z.H., "URANS Computation of Cavitating Flows around Skewed Propellers", *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, Vol.24, No.3, pp.339-346, 2012.
- [18] Kim, S., Choi, C., Kim, J., Park, J., and Baek, J., "Tip Clearance Effects on Cavitation Evolution and Head Breakdown in Turbopump Inducer", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.29, No.6, pp.1357-1366, 2013.
- [19] Launder, B. E., and Spalding, D., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, No.2, pp.269-289, 1974.
- [20] Sharma, K.R., "Principles of Mass Transfer", PHI Learning Pvt. Ltd., 2007.