ISME

مقایسه مدل‌های پیش‌بینی پارامترهای امواج انفجاری ابر هوا- سوخت

گلناز بشیری زاهد[۱]
دانشجوی کارشناسی ارشد

کیومرث مظاهری[۲]
استاد

مهم ترین مدل‌هایی که پارامتر های انفجار ابر هوا- سوخت را پیش بینی می کنند عبارتند از: مدل هم ارزیTNT، مدل چند انرژی و مدل Baker-Strehlow-Tang (BST). در کار حاضر به مدل سازی انفجار ابر هوا- سیکلوهگزان در نیروگاه فلیکسبورگ، توسط هریک از روش های مذکور پرداخته شده و نتایج پیش بینی شده با مقادیر مشاهده شده مقایسه گردیده است. تحقیق حاضر نشان می دهد که مدل هم ارزی TNT اغلب فشار بالاتری را نسبت به نتایج مشاهده شده در نزدیکی مرکز انفجار پیش بینی می کند. تغییرات حجم ابر هوا- سوخت تأثیر کم و تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله و میزان واکنش پذیری سوخت، تأثیر زیادی در فشار پیش بینی شده توسط روش چند انرژی و BST دارند. مدل های چند انرژی و BST تقریباً نتایج مشابهی ارائه می دهند.

واژه های راهنما: مدل هم ارزی TNT، مدل چند انرژی، مدل BST، ابر هوا- سوخت، موج انفجاری

۱- مقدمه

یکی از مسائل و مشکلاتی که همواره در مراکز تولید انتقال گازهای قابل اشتعال، مطرح بوده و هست وجود گازها و بخارات در محیط کارخانه در اثر نشتی از شیرآلات، تأسیسات و تبخیر از مخازن رو باز می باشد. این گازها با هوای محیط مخلوط شده و یک ابر هوا- سوخت قابل انفجار را تشکیل می دهند. تجمع ابر هوا- سوخت در یک محیط بسته و رسیدن یک عامل اشتعال به آن می تواند موجب انفجاری قوی گردد که باعث تخریب محیط و صدمه به کارکنان آن مراکز می شود. از نمونه انفجارهای مهم که باعث خسارات جانی و مالی زیادی گردیده است می توان به موارد زیر اشاره کرد[۲]:

- انفجار لادویشاون در آلمان (۱۹۴۸): در اثر شکست تانک حاوی دی متیل اتر که در زیر نور خوشید به شدت گرم شده بود دی متیل اتر در هوا آزاد گردید و ابری از هوا- دی متیل اتر تشکیل شد. در اثر انفجار این ابر اشتعال پذیر ۲۰۷ نفر کشته و ۳۸۱۸ نفر زخمی شدند.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس Golnaz19832000@yahoo.com
[۲] نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس kiumars@modares.ac.ir

- انفجار نوادا در آمریکا (۱۹۶۴): آزاد شدن هیدروژن در آزمایشگاه اندازه گیری امواج آکوستیک باعث تشکیل ابری از هوا- هیدروژن گردید. وجود یک منشا اشتعال باعث انفجار شدیدی شد.
- انفجار پورت هودسن در آمریکا (۱۹۷۰): در اثر شکست خط لوله حامل پروپان مایع، پروپان آزاد شد و ابری از هوا- پروپان تشکیل گردید.
- انفجار نیروگاه فلیکسبورگ (۱۹۷۴) در انگلستان: در واحد اکسیداسیون نیروگاه فلیکسبورگ، لوله بین دو رآکتور ترکید و مقدار زیادی سیکلوهگزان در عرض چند ثانیه در محیط آزاد گردید.

تاکنون روش های زیادی برای تخمین فشار ناشی از یک انفجار ابر هوا- سوخت ارائه گردیده است. از مهم ترین این روش ها می توان به روش هم ارزی TNT، روش چند انرژی و روش BST اشاره کرد. پارامتر های متعددی در این مدل ها وجود دارد که استفاده از انها را به عنوان یک ابزار صریح و راحت برای پیش بینی اثرات یک انفجار تقریبا غیر ممکن می سازد. هیچ روش سیستماتیکی در مراجع مختلف برای تعیین پارامتر های مدل های مختلف ذکر نشده است. لذا انتخاب مقدار مناسب برای بسیاری از پارامتر ها در پیش بینی اثرات ناشی از انفجار ابر هوا- سوخت بستگی فراوان به تجربه شخصی دارد.

استفاده از این مدل ها از دو دیدگاه می تواند مطرح باشد. دیدگاه اول برای بررسی یک انفجار اتفاق افتاده و یافتن دلایل آن و بعضی از پارامتر های انفجاری مانند فشار انفجار در نقاط مختلف. در این مورد بسیاری از پارامترهای مورد نیاز و ورودی این مدل‌ها باید از صحنه انفجار تخمین زده شود. این کار گرچه نهایتاً شامل تخمین زیادی می‌باشد، به مقدار زیادی به تجربه فردی بستگی دارد. متاسفانه اطلاعات قابل استفاده ای در این مورد در مراجع در دسترس در اختیار نمی‌باشد. تنها اطلاعات موجود مربوط به انفجار ابر هوا- سیکلوهگزان در نیروگاه فلیکسبورگ می‌باشد. در مرجع[۳] این انفجار با استفاده از مدل‌های مختلف بررسی شده است، اما متاسفانه فرضیاتی که برای محاسبه فشارناشی از انفجار سیکلوهگزان در نیروگاه فلیکسبورگ، توسط روش های هم ارزی TNT و چند انرژی در نظر گرفته شده، ذکر نگردیده است.

دیدگاه دوم در استفاده از این مدل‌ها مربوط به مطالعات پارامتری و مقایسه حالت های مختلف احتمال انفجار با استفاده از این مدل ها می باشد. این دیدگاه برای بررسی خطر وقوع یک انفجار می تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه معمولاً بدترین حالت به عنوان معیار در این تحلیل ها مورد نظر است، مدل‌های مورد اشاره در این مورد به راحتی قابل استفاده می‌باشند. گرچه در این مورد نیز تجربه فردی می تواند کمک موثری به تحلیل‌های دقیق‌تر باشد.

باتوجه به اهمیت کاربردی دیدگاه اول و وابستگی بسیار زیاد پیش بینی‌ها به تجربه شخصی، به نظر می رسد اطلاع از حساسیت و اهمیت پارامترهای مختلف در پیش بینی فشار ناشی از انفجار، کمک موثری به دستیابی به یک روش سیستماتیک برای تحلیل یک انفجار ابر هوا- سوخت باشد. لذا در کار حاضر، برای تعیین وابستگی نتایج پیش بینی به پارامتر های مختلف، میزان حساسیت هریک از روش ها در پیش بینی فشار ناشی از انفجار، نسبت به برخی پارامتر های مهم مانند مقدار جرم سوخت و واکنش پذیری آن، حجم ابرهوا- سوخت و نوع انبساط آن و میزان تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به اطلاعات بسیار ناچیز موجود در منابع در دسترس، اطلاعات ارائه شده در مرجع[۳] مربوط به انفجار

ناشی از انفجار سیکلوهگزان در نیروگاه فلیکسبورگ. به عنوان معیار این حساسیت سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در ادامه بعد از معرفی مختصر مدل‌های مورد بررسی، به حساسیت سنجی پارامترهای مختلف این مدل ها پرداخته خواهد شد.

۲- مدل‌های مهم پیش‌بینی افزایش فشار ناشی از انفجار ابر هوا- سوخت

۲-۱- مدل هم‌ارزی TNT [۸،۲]

در روش هم‌ارزیTNT، با توجه به شناختی که در مورد ماده شدید الانفجار TNT وجود دارد و اطلاعات زیاد منتشر شده در مورد پارامتر های انفجاری این ماده، قدرت انفجاری ابر هوا- سوخت با مقدار انرژی آزاد شده توسط جرم معادل ماده شدید الانفجار *TNT* تخمین زده می شود. جرم معادل *TNT* در ابر هوا- سوخت طبق رابطه (۱) برابر است با:

$$W_{TNT} = \alpha \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \qquad (۱)$$

در این رابطه W_{TNT} جرم معادل *TNT* ، H_f گرمای احتراق سوخت، H_{TNT} انرژی حاصل از انفجار یک کیلوگرم *TNT* که برابر $4.68[MJ/kg]$می‌باشد. فاکتور هم ارزی و W_fجرم سوخت موجود در ابر هوا- سوخت می‌باشد که از رابطه (۲) بدست می آید:

$$W_f = F.m \qquad (۲)$$

در این رابطه m جرم کل سوخت آزاد شده. و F کسر اشتعال پذیری می باشند. اگر تشکیل ابر به صورت اسپری و یا گرد باشد رابطه (۲) در عدد ۲ نیز ضرب خواهد شد. [۲].

کسر اشتعال پذیری ضریبی است که بر اساس داده های ترمودینامیکی سوخت، طبق رابطه (۳)، به دست می‌آید[۲]:

$$F = 1 - \exp\left[\frac{-c_p \Delta T}{L}\right] \qquad (۳)$$

در این رابطه c_p گرمای ویژه متوسط سوخت، ΔT اختلاف دما بین دمای محیط و دمای جوشش سوخت در فشار محیط و L گرمای نهان تبخیر سوخت است. در مدل طولی به نام فاصله معادل هاپکینسون تعریف می شود (رابطه (۴)). این فاصله برای سوخت های مختلف با جرم معادل *TNT* یکسان در فاصله برابر از مرکز انفجار یکسان است.

$$\overline{R} = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، $\bar{R}$ فاصله معادل هاپکینسون بر حسب $[m/kg^{1/3}]$، W_{TNT} جرم معادل TNT بر حسب $[kg]$ و R فاصله از مرکز انفجار بر حسب $[m]$ است [2,4,8]. فاکتور هم ارزی بستگی به حضور موانع، محدودیت ها و طبیعت سوخت دارد. این فاکتور بر اساس مقادیر مشاهده شده از بررسی انفجارهای بزرگ با توجه به انرژی تخریب آنها استنباط می شود. براسی و سیمپسون مقادیری محافظه کارانه ای را برای فاکتور هم ارزی ارائه داده اند که برای فواصل دور از منبع انفجار ۵٪ و برای فواصل نزدیک به منبع انفجار ۲٪ در نظر گرفته می شود[۲]. کمپانی IRI[1] مقدار ۲٪ و موسسه HSE[2] انگلیس مقدار ۳٪ را برای فاکتور هم ارزی پیشنهاد داده اند[۲]. پس از به دست آوردن فاصله معادل با رجوع به نمودار شکل(۱)، مقدار افزایش فشار ناشی از انفجار طبق این روش به دست می‌آید.

۲-۲- مدل چند انرژی[۹،۵]

وجود موانع بر سر راه حرکت شعله موجب مغشوش شدن جریان می گردد. در روش چند انرژی، اغتشاش عامل مهمی در انفجار و تولید امواج انفجاری است. در روش چند انرژی یک حادثه انفجاری ناشی از ابر هوا- سوخت به چند زیر حادثه انفجاری تقسیم می شود. به عبارت دیگر موج انفجاری تولید شده توسط هرکدام از منشأهای انفجار، به طور جداگانه بررسی می‌گردد. این مدل ابر هوا- سوخت را یک مخلوط گازی با نسبت هم ارزی یک و به صورت یک نیمکره با سرعت شعله ثابت در نظر می گیرد[۱۰].

در این روش قدرت انفجار توسط یک شاخص مشخص می شود. انتخاب شاخص مورد نظر خود به میزان به هم فشردگی موانع، شدت واکنش پذیری سوخت و نوع انبساط ابر هوا- سوخت بستگی دارد. مقدار این شاخص با اعداد ۱ تا ۱۰ بیان می شود. مقدار ۱۰ نشان دهنده انفجار بسیار قوی مافوق صوت و مقدار ۱ نشان دهنده یک انفجار از نوع احتراق ملایم است. شاخص های دیگر مربوط به قدرت های دیگری از انفجار ابر هوا- سوخت است که بین دو مقدار احتراق مافوق صوت و ملایم قرار می گیرند. شاخص های زیر ۶ مربوط به شعله وری بوده به طوریکه شاخص ۶ مربوط به یک شعله وری قوی است. با افزایش قدرت و شدت انفجار، شعله وری قوی و قویتر شده تا جایی که به یک انفجار مافوق صوت تبدیل می گردد در این صورت عدد مربوط به شاخص هم افزایش می یابد[۲].

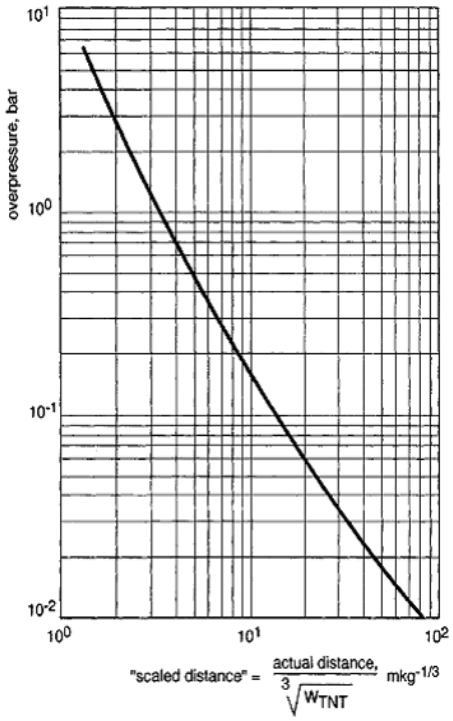
نوع انبساط ابر هوا- سوخت برای فرآیند انفجار طبق تقسیم بندی زیر عبارت است از:

- انبساط ابر هوا- سوخت در تمام جهات باشد (سه بعدی).
- انبساط ابر هوا- سوخت بین دو صفحه موازی باشد (دو بعدی).
- انبساط ابر هوا- سوخت در یک تونل و یا در یک ساختار لوله ای باشد (یک بعدی).

این روش نتایج مدل سازی را به صورت خانواده ای از منحنی ها بر اساس تابعی از شاخص قدرت انفجار ابر هوا- سوخت و فاصله ارائه داده است؛ که در شکل (۲) مشاهده می شود.

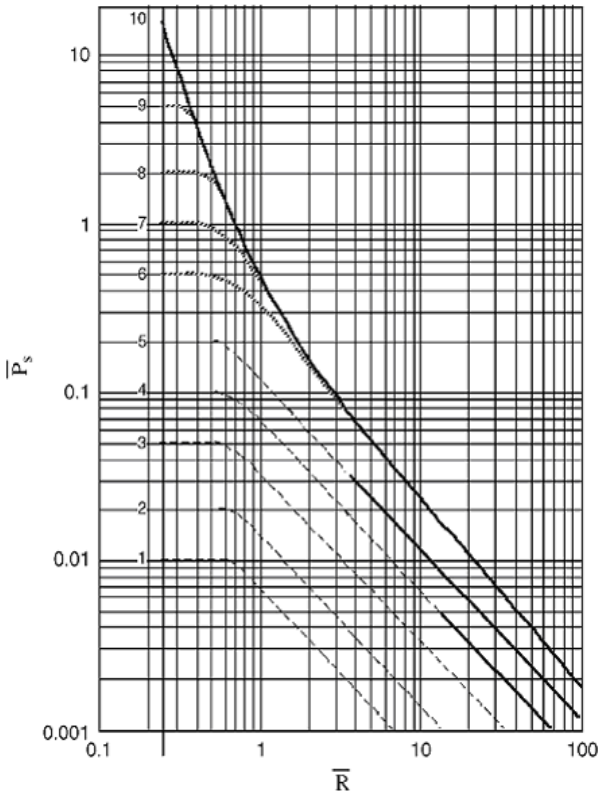
---

[1] Industrial Risk Insurers
[2] Health & Safety Executive



شکل۱- مقدار فشار بر حسب فاصله معادل هاپکینسون
در مدل هم ارزی TNT [۲]

برای انتخاب شاخص قدرت انفجاری ابر هوا- سوخت جدول (۱) به عنوان راهنمای شاخص قدرت ارائه شده است.



شکل۲- مقدار فشار بدون بعد بر حسب فاصله معادل در روش چند انرژی[۲]

جدول۱- راهنمای انتخاب شاخص قدرت انفجاری ابر بخار در روش چند انرژی[۶]

نوع انبساط ابر بخار	واکنش پذیری ابر	شاخص قدرت انفجاری ابر بخار		
		درجه بهم فشردگی موانع در محیط		
		بالا	متوسط	پایین
یک بعدی (1D)	بالا	۱۰	۱۰	۱۰
	متوسط	۹-۱۰	۹	۷-۸
	پایین	۹-۱۰	۷-۸	۴-۵
دو بعدی (2D)	بالا	۹	۷-۸	۶
	متوسط	۷-۸	۶-۷	۲-۳
	پایین	۶	۵-۶	۱-۲
سه بعدی (3D)	بالا	۶	۳	۱
	متوسط	۳-۴	۲	۱
	پایین	۳	۲	۱

فاصله معادل بر اساس انرژی احتراق در این روش طبق رابطه (۵) برابر است با:

$$\overline{R} = \frac{R}{\left(E/P_0\right)^{1/3}} \qquad (۵)$$

در این رابطه $\overline{R}$ فاصله معادل از مرکز سوخت، R فاصله واقعی از مرکز سوخت بر حسب $[m]$، E انرژی احتراق سوخت بر حسب $[J]$ است که مقدار این انرژی برای مخلوط هوا- سوخت هیدروکربنی، قابل اشتعال، همگن و هم ارزی برابر حاصلضرب $3.5[MJ/m^3]$ درحجم ابر هوا- سوخت در نظر گرفته می شود و P_0 فشار محیط برحسب $[Pa]$ است[۵، ۲]. پس از انتخاب شاخص و محاسبه فاصله معادل با رجوع به نمودار شکل(۲)، فشار ناشی از انفجار محاسبه می شود. در این نمودار محور عمودی فشار انفجار است که با فشار محیط بدون بعد شده است.

۲-۳- مدل BST

در این روش نیز فاصله معادل از رابطه (۵) (مربوط به روش چند انرژی) به دست می آید. و درجه به هم فشردگی موانع به عنوان یک عامل موثر در قدرت انفجار در نظر گرفته می‌شود. هر چقدر موانع در محیط به هم فشرده‌تر باشند، در این صورت جریان انفجاری مغشوش‌تر شده و در نتیجه سرعت شعله افزایش می‌یابد؛

و در نتیجه عدد ماخ سرعت شعله بالاتر خواهد شد[۷]. این روش بر اساس سرعت شعله بیان شده است که این سرعت بر اساس سه فاکتور مهم انتخاب می‌گردد[۸]:

- خصوصیات گسترش شعله، مرتبط با محدودیت، شرایط و فضای هندسی محیط.
- شدت واکنش پذیری سوخت در ابر هوا- سوخت.
- میزان تراکم موانع در واحد فرآیندی.

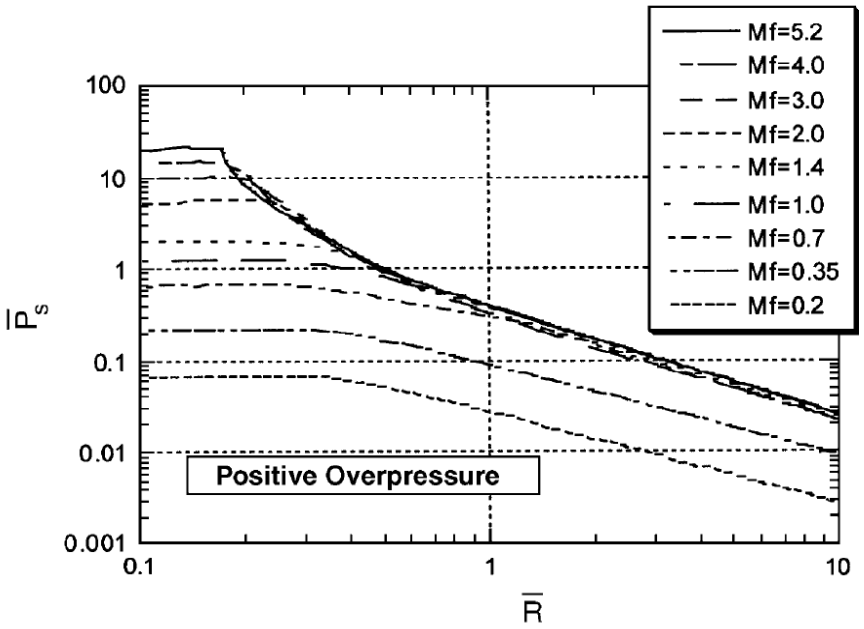
برای انتخاب عدد ماخ سرعت شعله جدولی به صورت جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول واکنش پذیری سوخت در ابر هوا- سوخت و همچنین درجه به هم فشردگی موانع به سه درجه بالا، متوسط و پایین تقسیم می شود. پس از به دست آوردن عدد ماخ سرعت شعله با توجه به جدول (۲) و محاسبه فاصله معادل با رجوع به نمودار شکل (۳)، فشار ناشی از انفجار از شکل (۳) بدست می آید.

۳- انفجار در نیروگاه فلیکسبورگ انگلستان

یکی از مهم‌ترین اتفاقات انفجاری در تاریخ صنایع شیمیایی در اول ماه ژوئن سال (۱۹۷۴) میلادی در نیروگاه فلیکسبورگ انگلستان به وقوع پیوست. حادثه به این صورت بود که؛ در واحد اکسیداسیون نیروگاه، لوله بین دو رآکتور ترکید و مقدار زیادی سیکلوهگزان در عرض چند ثانیه با فشار ۱۰ بار دمای ۴۲۳ کلوین در محیط آزاد گردید. گاز سیکلوهگزان به سرعت با هوا مخلوط شد و ابر بزرگی از سوخت- هوا نیروگاه را در بر گرفت. وجود یک منشأ اشتعال ناشناخته باعث شروع حادثه گردید[۲]. در این بخش، با استفاده از سه روش هم ارزیTNT، چند انرژی وBST، فشار ناشی از انفجار ابر بخار سیکلوهگزان محاسبه شده و با تخمین فشار که از مشاهدات در مرجع [۲] آمده است، مقایسه می گردد.

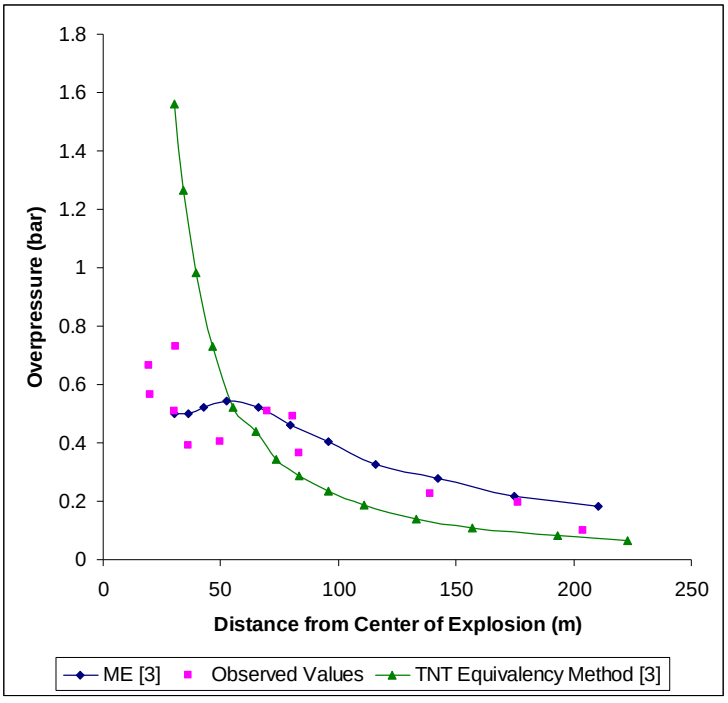
جدول۲- سرعت شعله بصورت عدد ماخ (Mf) برای منابع اشتعال در مدل BST [۶]

انبساط شعله	واکنش‌پذیری سوخت	دانسیته موانع		
		پایین	متوسط	بالا
1D	بالا	۵/۲	۵/۲	۵/۲
	متوسط	۱/۰۳	۱/۷۷	۲/۲۷
	پایین	۰/۲۹۴	۱/۰۳	۲/۲۷
2D	بالا	۰/۵۹	۱/۰۳	۱/۷۷
	متوسط	۰/۴۷	۰/۶۶	۱/۶
	پایین	۰/۰۷۹	۰/۴۷	۰/۶۶
2/5D	بالا	۰/۴۷	۰/۵۸	۱/۱۸
	متوسط	۰/۲۹	۰/۵۵	۱/۰
	پایین	۰/۰۵۳	۰/۳۵	۰/۵۰
3D	بالا	۰/۳۶	۰/۱۵۳	۰/۵۸۸
	متوسط	۰/۱۱	۰/۴۴	۰/۵۰
	پایین	۰/۰۲۶	۰/۲۳	۰/۳۴



شکل ۳- تغییرات فشار بدون بعد بر حسب فاصله معادل در روش BST [۶]

در مرجع [۳] با استفاده از نتایج ثبت شده از انفجار به پیش بینی فشار حاصل از انفجار توسط دو روش هم ارزی TNT و چند انرژی پرداخته شده است. نتایج محاسبات انجام شده در کنار مقادیر ثبت شده در محل وقوع حادثه درشکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در اکثر فواصل نتایج واقعی بین نتایج پیش بینی شده توسط این دو مدل می باشند.



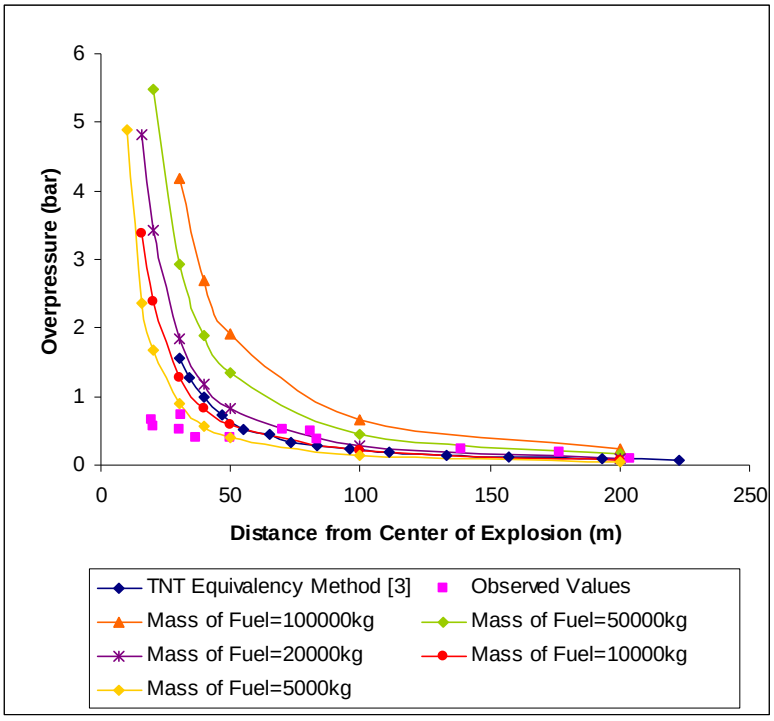
شکل ۴- مقادیر مشاهده شده و نتایج فشار به دست آمده توسط روش های هم ارزی TNT و چند انرژی ثبت شده در مرجع[۳]

۴- حساسیت‌سنجی پارامترهای مدل‌ها در پیش‌بینی فشار انفجار

مرجع [۳] تنها مرجعی است که اطلاعاتی در مورد موارد مشاهده شده در انفجار فلیکسبورگ منتشر کرده است. در این مرجع همچنین سعی شده است که با تخمین بعضی از ورودی های دو مدل هم ارزی TNT و چند انرژی به ارزیابی این مدل‌ها در پیش‌بینی فشار امواج انفجاری ناشی از این انفجار بپردازد. متاسفانه هیچگونه اطلاعاتی درباره پارامترهای ورودی مدل ها، از قبیل مقدار جرم سوخت و واکنش پذیری آن، حجم ابرهوا- سوخت و نوع انبساط آن و میزان تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله، که برای محاسبه فشار ناشی از انفجارلازم است، در این مرجع ارائه نشده است. در استفاده از این مدل ها در واقع مشکل اصلی تعیین مقدار پارامترهای ورودی مدل‌ها می‌باشد. بنابراین درکارحاضر، قبل از انتخاب پارامترهای ورودی مدل‌ها، میزان حساسیت هریک از روش‌ها در پیش‌بینی فشار ناشی از انفجار، نسبت به پارامترهای مهم آنها سنجیده شود.

۴-۱- حساسیت روش هم‌ارزی TNT به جرم سوخت و فاکتور هم‌ارزی TNT

دو پارامتر ورودی مهم در مدل هم ارزی TNT، مقدار جرم سوخت موجود در ابر هوا سوخت و فاکتور هم ارزی TNT است. انتخاب فاکتور هم ارزی TNT بر اساس مقادیری است که توسط شرکت ها و موسسات مختلف ارائه شده است در این حالت مقدار۰/۰۳ که توسط HSE ارائه شده است، انتخاب می گردد. برای بررسی حساسیت این روش نسبت به جرم سیکلوهگزان، برای ۵ جرم مختلف، فشار ناشی از انفجار این سوخت در نیروگاه فلیکسبورگ توسط روش هم ارزی TNT با فاکتور هم ارزی ۰/۰۳ محاسبه و نتایج حاصل از آن با مقادیر ارائه شده در مرجع [۳] مقایسه می گردند (شکل ۵).



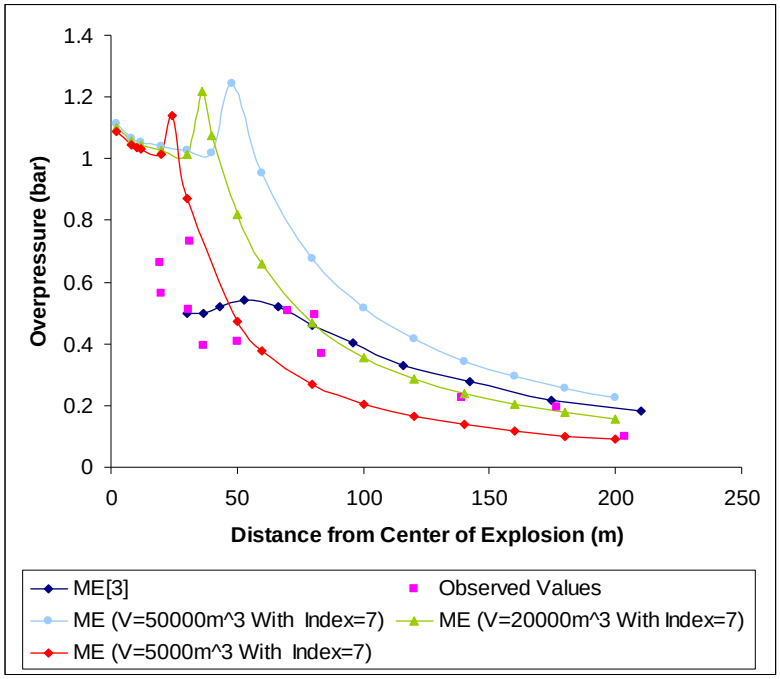
شکل۵- مقایسه بین نتایج فشار محاسبه شده بر حسب فاصله از مرکز انفجار توسط روش هم ارزی TNT (با فاکتور هم ارزی۰/۰۳)، برای ۵ جرم مختلف سیکلوهگزان در انفجار فلیکسبورگ با مقادیر ارائه شده در مرجع [۳]

در شکل (۵) مشاهده می‌گردد که با افزایش جرم سوخت موجود در ابر هوا- سوخت، مقدار فشار ناشی از انفجار (به خصوص در فواصل کمتر۱۰۰ متر از مرکز انفجار) افزایش می‌یابد و از فاصله ۱۰۰ متری به بعد از مرکز انفجار افزایش جرم سوخت موجود در ابرهوا- سوخت تاثیر چندانی در مقدار فشار ناشی از انفجار ندارد.

فاکتورهایی از قبیل نوع انبساط ابر هوا- سوخت، واکنش پذیری سوخت، حجم ابر هوا- سوخت و میزان تراکم موانع در محیط بر پیش‌بینی فشار حاصل از یک انفجار توسط روش‌های چندانرژی و BST مؤثر است. بنابراین در ادامه حساسیت هریک از این روش‌ها در پیش‌بینی فشار، نسبت به این عوامل سنجیده می‌شود.

۴-۲- حساسیت روش چند انرژی نسبت به حجم ابر هوا- سوخت

حجم ابر هوا- سوخت یکی از پارامترهای ورودی مهم در محاسبات روش چند انرژی است. برای بررسی حساسیت این روش نسبت به پارامتر ذکر شده در پیش بینی فشار ناشی از انفجار، اثر تغییرات حجم اولیه ابر هوا- سیکلوهگزان در حالت یک بعدی، واکنش پذیری سیکلوهگزان و تراکم موانع در محیط پایین (شاخص=۷)، برای سه حجم ۵۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۵۰۰۰ مترمکعب در شکل (۶) نشان داده شده است.



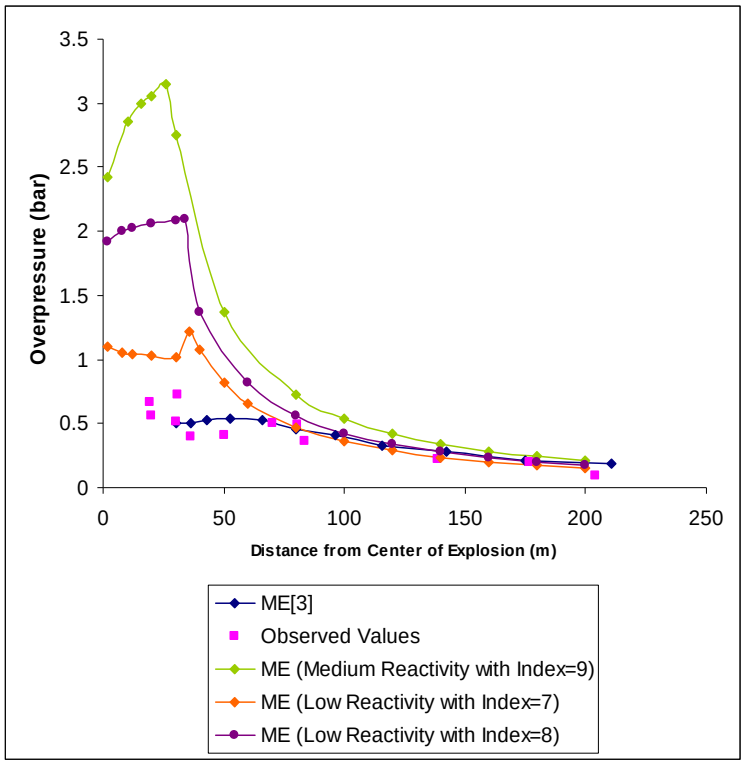
شکل ۶- حساسیت روش چند انرژی نسبت به تغییرات حجم ابر هوا- سیکلوهگزان در حالت یک بعدی، واکنش پذیری سیکلوهگزان متوسط و تراکم موانع در محیط پایین (شاخص=۷)

شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش حجم ابر هوا- سوخت منحنی های پیش بینی فشار ناشی از انفجار به سمت راست انتقال می‌یابد. این منحنی‌ها دارای مقدار بیشینه‌ای است که با افزایش حجم ابر هوا- سوخت تغییر چندانی در مقدار آن ایجاد نمی شود، به عبارت دیگر می توان گفت که تغییر در حجم ابر هوا- سوخت تاثیر چندانی در مقدار ماکزیمم فشار ندارد. بیشترین اختلاف در نتایج پیش بینی شده با مقادیر مشاهده شده فشار در فواصل کمتر از ۱۰۰ متر از مرکز انفجار است. نتایج فشار پیش بینی شده برای سه حجم

مختلف ابر هوا- سوخت از فاصله ۱۵۰ متری به بعد از مرکز انفجار تقریباً یکسان می گردد، به عبارت دیگر از فاصله ۱۵۰ متری به بعد از مرکز انفجار، تغییرات حجم ابر هوا- سوخت در پیش بینی فشار ناشی از انفجار تقریباً بی تاثیر است.

۴-۳- حساسیت روش چند انرژی نسبت به واکنش پذیری سوخت

یکی از پارامترهای ورودی مهم در روش چند انرژی، واکنش پذیری سوخت موجود در ابر هوا- سوخت است. برای بررسی تاثیر این پارامتر در پیش بینی فشار ناشی از انفجار در این روش، حساسیت نسبت به تغییرات واکنش پذیری سیکلوهگزان در حالت یک بعدی و تراکم موانع در محیط متوسط، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب در شکل (۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در نظر گرفتن سیکلوهگزان با واکنش پذیری بالا، فشاری بسیار بیشتر از مقادیر مشاهده شده پیش بینی می کند.

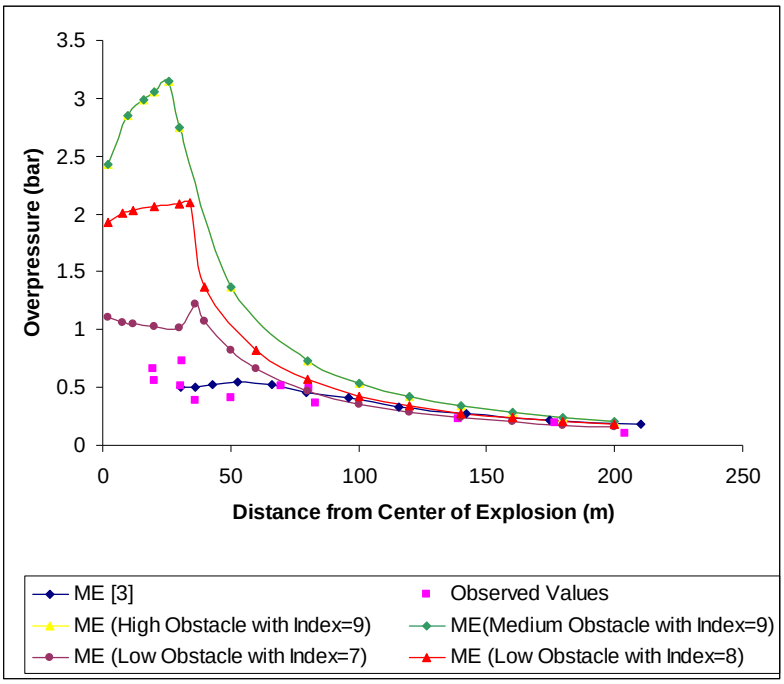


شکل ۷- حساسیت روش چند انرژی نسبت به تغییرات واکنش پذیری سیکلوهگزان در حالت یک بعدی و تراکم موانع در محیط متوسط، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش واکنش‌پذیری سوخت مقادیر فشار پیش‌بینی شده ناشی از انفجار افزایش می‌یابد (به خصوص در فواصل کمتر از ۱۰۰ متر از مرکز انفجار)، اما محل فشار بیشینه تغییر چندانی نمی‌کند. از فاصله ۱۰۰ متری به بعد از مرکز انفجار، نتایج فشار پیش‌بینی شده، برای واکنش‌پذیری‌های مختلف، تقریباً یکسان می‌گردد. به عبارت دیگر تاثیر واکنش‌پذیری سوخت در پیش‌بینی فشار در نزدیکی مرکز انفجار بیشتر است.

۴-۴- حساسیت روش چند انرژی نسبت به تراکم موانع

یکی دیگر از پارامترهای موثر در پیش بینی فشار ناشی از یک انفجار، تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط انفجاری است. برای بررسی حساسیت این پارامتر، تغییرات تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در حالت یک بعدی و واکنش پذیری سیکلوهگزان متوسط، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب در شکل (۸) بررسی شده است.



شکل ۸- حساسیت روش چند انرژی نسبت به تغییرات تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط در حالت یک بعدی و واکنش پذیری سیکلوهگزان متوسط، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب

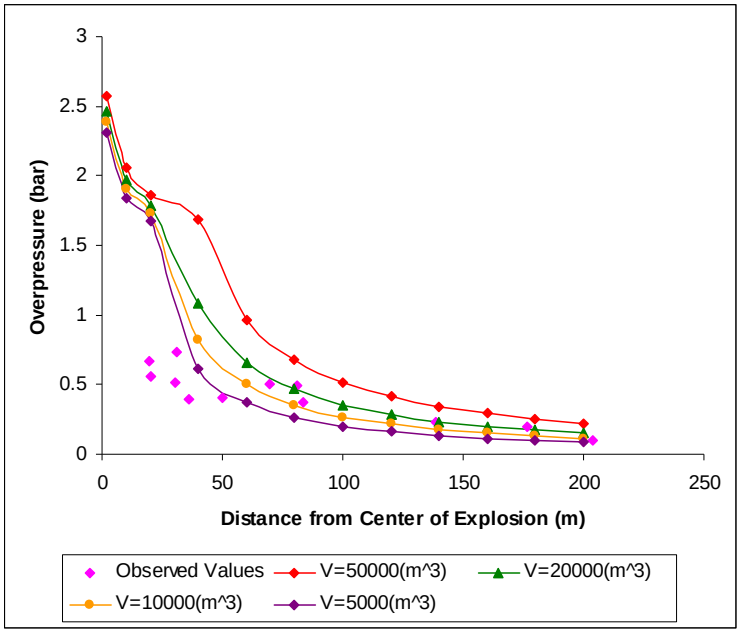
با بررسی شکل (۸) مشاهده می شود فشار پیش بینی شده با توجه به حساسیت روش چند انرژی نسبت به تغییرات تراکم موانع، به علت یکی شدن شاخص های انفجار شبیه به شکل (۷) است. بنابراین همان نتایج حاصل خواهد شد. با بررسی شکل های (۷) و (۸) مشاهده می گردد که در روش چند انرژی تاثیرات واکنش پذیری سوخت و میزان تراکم موانع در سر راه حرکت شعله در پیش بینی فشار ناشی از یک انفجار بسیار موثر است و حساسیت این روش نسبت به این دو پارامتر به خصوص در نزدیکی مرکز انفجار (فواصل کمتر از ۵۰ متر) بسیار بالاست.

۴-۵- حساسیت روش BST نسبت به حجم سوخت موجود در ابر هوا- سوخت

مانند روش چند انرژی، در روش BST، نیز حجم ابر هوا- سوخت یک پارامتر ورودی مهم است و لازم است تاثیر این پارامتر در پیش بینی فشار ناشی از انفجار بررسی گردد. حساسیت این روش به تغییرات حجم ابر هوا سیکلوهگزان در حالت یک بعدی، واکنش پذیری سیکلوهگزان متوسط و تراکم موانع در محیط پایین

(عدد ماخ شعله =۱/۰۳)، برای ۳ حجم ۵۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۵۰۰۰ مترمکعب در شکل (۹) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۹) مشاهده می گردد که با افزایش حجم ابر هوا- سوخت نمودار فشار پیش بینی شده به سمت راست انتقال می یابد و در فواصل کمتر از ۲۵ متر و بیشتر از ۱۰۰ متر از مرکز انفجار نتایج یکساتی ارائه داده می‌شود. درکل میتوان گفت حساسیت روش BST ، نسبت به حجم ابر هوا- سوخت کم می‌باشد.



شکل ۹- حساسیت روش BST نسبت به تغییرات حجم ابر هوا سیکلوهگزان در حالت یک بعدی، واکنش پذیری سیکلوهگزان متوسط و تراکم موانع در محیط پایین (عدد ماخ شعله =۱/۰۳)، برای ۴ حجم ۵۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۵۰۰۰ مترمکعب

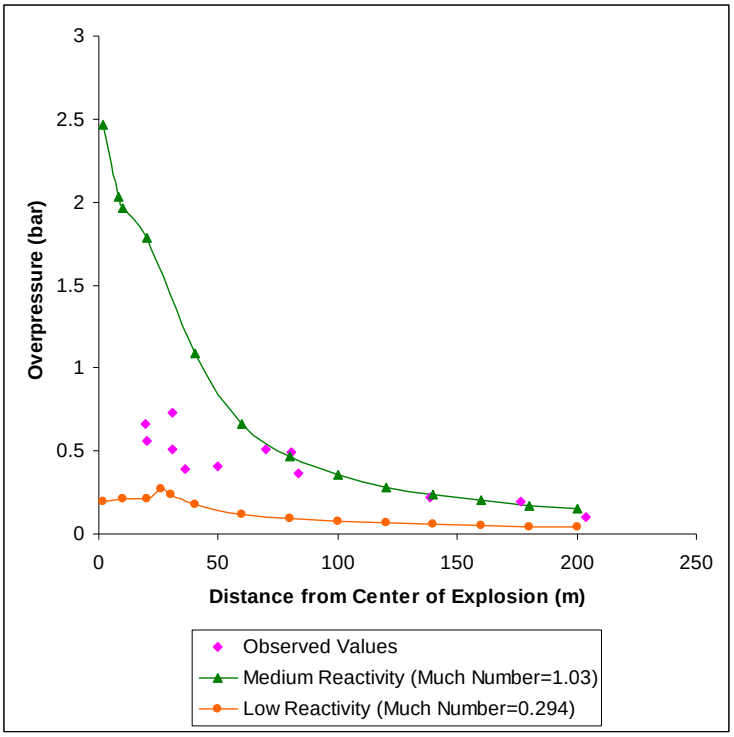
۴-۶- حساسیت روش BST نسبت به واکنش پذیری سوخت

پارامتر مهم دیگر در روش BST، واکنش پذیری سوخت است. برای بررسی تاثیر این پارامتر، حساسیت نسبت به تغییرات واکنش پذیری سیکلوهگزان در حالت یک بعدی و تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط پایین، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

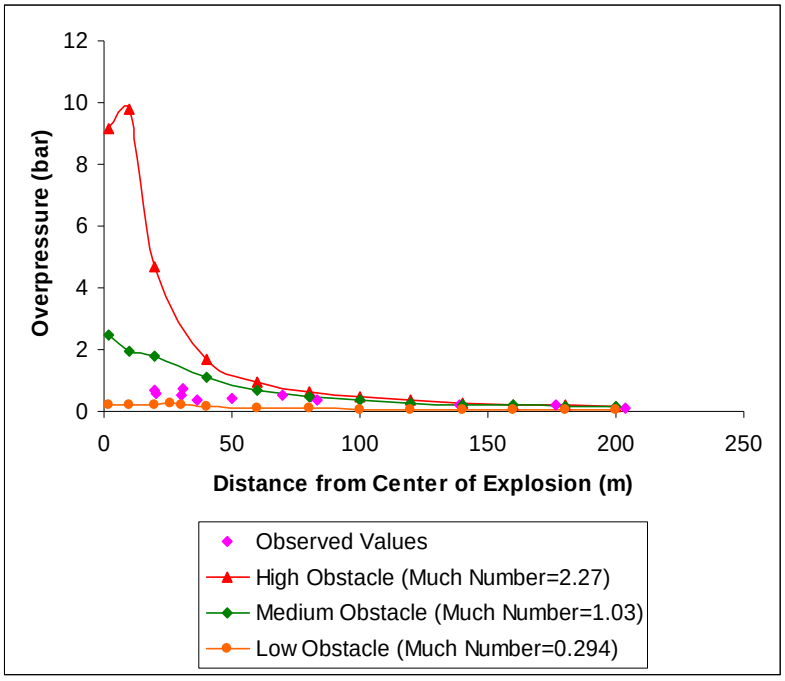
با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می گردد که واکنش پذیری سوخت تاثیر زیادی در پیش بینی فشار ناشی از انفجار دارد. تأثیر این پارامتر به خصوص در فواصل کمتر از ۵۰ متر از مرکز انفجار بیشتر مشاهده می شود. از فاصله ۵۰ متر به بعد از مرکز انفجار نتایج فشار پیش بینی شده توسط این روش تغییر چندانی نکرده و به مقادیر مشاهده شده نزدیک می گردد. به علت بالاتر بودن نتایج فشار پیش بینی شده برای حالت واکنش پذیری بالای سوخت از آوردن نمودار مربوط به آن اجتناب شده است.

۴-۷- حساسیت روش BST نسبت به تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط

پارامتر مورد بررسی دیگر در حساسیت روش BST، مانند روش چند انرژی، میزان تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله است. حساسیت این پارامتر نسبت به تغییرات تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط در حالت یک بعدی و واکنش پذیری سیکلوهگزان پایین، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- حساسیت روش BST نسبت به تغییرات واکنش پذیری سیکلوهگزان در حالت یک بعدی و تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط کم، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب



شکل۱۱– حساسیت روش BST نسبت به تغییرات تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله در محیط در حالت یک بعدی و واکنش پذیری سیکلوهگزان پایین، برای حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ مترمکعب

با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می گردد که با افزایش میزان تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله فشار پیش بینی شده حاصل از انفجار به شدت افزایش می یابد. این تاثیر بیشتر در فواصل کمتر از ۵۰ متر از مرکز انفجار مشاهده می شود. از فاصله ۵۰ متر به بعد از مرکز انفجار نتایج فشار پیش بینی شده توسط این روش تغییر چندانی نکرده و به مقادیر مشاهده شده نزدیک می گردد. به عبارت دیگر می توان گفت حساسیت روش BST، نسبت به میزان تراکم موانع بر سر راه حرکت شعله بالا است. با بررسی شکل های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌گردد که در روشBST تاثیرات واکنش‌پذیری سوخت و میزان تراکم موانع در سر راه حرکت شعله در پیش بینی فشار ناشی از یک انفجار بسیار موثر است و حساسیت این روش نسبت به این دو پارامتر به خصوص در نزدیکی مرکز انفجار (فواصل کمتر از ۵۰ متر) بسیار بالاست. و با توجه به شکل (۹) دیده می شود که میزان تاثیر حجم ابر هوا- سوخت در پیش‌بینی فشار ناشی از انفجار به اندازه تاثیر واکنش‌پذیری سوخت و میزان تراکم موانع نیست. در حالت یک بعدی، واکنش‌پذیری سوخت پایین و دانسیته موانع متوسط نتایج حاصل از پیش‌بینی فشار توسط روش BST در نزدیکی مرکز انفجار(فواصل کمتر از ۴۰ متر) بیشتر از روش چند انرژی است. اما از این فاصله به بعد نتایج حاصل از دو روش بر هم منطبق می گردد. به عبارت دیگر اختلاف در پیش بینی فشار توسط این دو روش در نزدیکی مرکز انفجار است.

با بررسی حساسیت هریک از روش ها نسبت به پارامترهای مهم ذکر شده مشاهده می شود که تاثیر میزان تراکم موانع و واکنش پذیری سوخت در پیش بینی فشار ناشی از یک انفجار، بیشتر از مقدار جرم سوخت و حجم ابر هوا- سوخت است.

۵- مقایسه نتایج به دست‌آمده فشار بر حسب فاصله از مرکز انفجار توسط روش‌های هم ارزیTNT، چند انرژی وBST در انفجار ابرهوا- سیکلوهگزان و مقادیر مشاهده شده در مرجع[۳]

پس از حساسیت‌سنجی هریک از روش‌ها نسبت به عوامل بررسی شده و مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر مشاهده شده در مرجع[۳]، فرضیات زیر برای انفجار ابر هوا- سیکلوهگزان نیروگاه فلیکسبورگ در نظر گرفته می شود:

۱- حجم ابر هوا- سیکلوهگزان ۲۰۰۰۰ متر مکعب

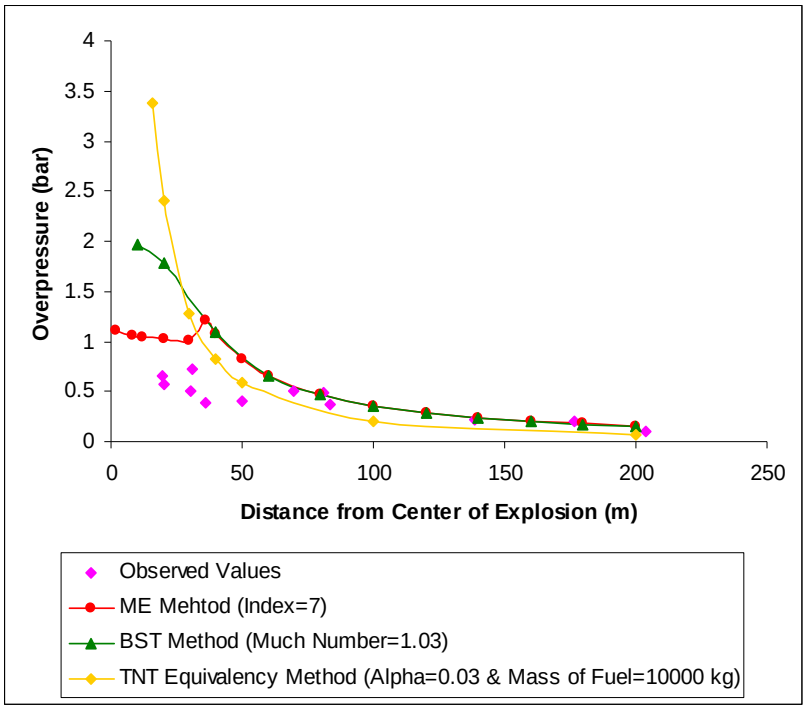
۲- جرم سیکلوهگزان موجود در ابر هوا- سیکلوهگزان ۱۰۰۰۰ کیلوگرم

۳- فاکتور هم ارزی در روش هم ارزی TNT برابر ۰/۰۳

۴- شاخص انفجاری در روش چند انرژی برابر ۷

۵- عدد ماخ شعله در روش BST برابر ۱/۰۳

با در نظر گرفتن این فرضیات به محاسبه فشار ناشی از انفجار ابر هوا- سیکلوهگزان نیروگاه فلیکسبورگ پرداخته می شود و مقادیر به دست آمده با مقادیر مشاهده شده در مرجع[۳] مقایسه می گردند. این نتایج در شکل (۱۲) نشان داده شده اند.



شکل ۱۲- مقایسه نتایج به دست آمده فشار بر حسب فاصله از مرکز انفجار توسط روشهای هم ارزیTNT (فاکتور هم ارزی=۰/۰۳)، چند انرژی (شاخص=۷) وBST (عدد ماخ شعله=۱/۰۳) در انفجار ابر بخار سیکلوهگزان در نیروگاه فلیکسبورگ و مقادیر مشاهده شده در مرجع[۳]

با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می شود که نتایج فشار پیش بینی شده توسط هر سه روش از فاصله ۵۰ متری به بعد از مرکز انفجار، به مقادیر مشاهده شده نزدیک می گردد و بیشترین اختلاف در پیش بینی فشار در نزدیکی مرکز انفجار به خصوص در فواصل کمتر از ۵۰ متر است. بعد از این فاصله نتایج حاصل از پیش بینی فشار توسط دو روش چند انرژی و BST از فاصله ۴۰ متری به بعد از مرکز انفجار کاملاً بر هم منطبق گردیده است. بیشترین تفاوت در پیش بینی فشار توسط روش هم ارزی TNT و در نزدیکی مرکز انفجار است.

نتیجه‌گیری

با استفاده از مدل‌های ساده سازی شده برای پیش‌بینی انفجار ابر هوا- سوخت، به شرط معلوم بودن اطلاعات ورودی مدل‌ها، به راحتی می‌توان پیامدهای حوادث را مطالعه و بررسی کرد. اگر هدف پیش‌بینی پیامدهای یک انفجار ناخواسته قبل از طراحی یک مجموعه صنعتی باشد، طبیعی است بدترین سناریو انتخاب و محاسبات با استفاده از مدل‌های ارائه شده امکان‌پذیر است. در بسیاری از مواقع کاربرد این مدل‌ها به بعد از یک حادثه انفجاری و به منظور پیدا کردن دلیل انفجار مربوط می شود. با توجه به نامعلوم بودن بسیاری از پارامترها در یک پدیده کاملا پیش‌بینی نشده و پیچیده مانند انفجار ابر هواسوخت، در این حالت استفاده از این مدل‌ها بسیار مبهم و پیچیده می‌باشد. در تحقیق صورت گرفته نشان داده شد که علیرغم سادگی استفاده از مهم‌ترین مدل‌های ارائه شده در ۲۰ سال گذشته، چگونگی استفاده از آنها برای یک انفجار واقعی یک امر بدیهی نمی باشد.

با توجه به معلوم نبودن پارامترهای ورودی مدل ها در یک حادثه پیش بینی نشده، در مطالعه حاضر، سعی شد با استفاده از اطلاعات یک انفجار واقعی حساسیت پیامدهای پیش بینی شده از مدل‌ها به پارامترهای ورودی سنجیده شده و با توجه به این حساسیت‌ها، پارامتر های مربوط به انفجار در نیروگاه فلیکسبورگ انتخاب گردند. استفاده صحیح از این مدل ها برای پیش بینی دلایل یک انفجار به مقدار زیادی به تجربه شخصی افراد، و نشانه هایی که در محیط یافت می شود دارد. نتایج بررسی فعلی نشان می دهند که نتایج کلی پیش‌بینی شده بوسیله مدل‌ها، بخصوص در فواصل دور ز مرکز شروع انفجار، تفاوت عمده‌ای با یکدیگر ندارند.

در روش هم ارزی TNT پتانسیل انفجاری ابر هوا- سوخت نسبت مستقیم با کمیت کلی سوخت موجود در ابر دارد. TNT یک ماده منفجره قوی است که در اثر انفجار یک موج شوک با قدرت بالا و زمان تداوم کوتاهی را تولید می کند در حالیکه انفجار یک ابر هوا- سوخت اغلب بدون موج ضربه ای و یا دارای موج شوک با قدرتی ضعیف است اما دارای زمان تداوم موج طولانی است. شکل موج و زمان تداوم موج در فاز مثبت دو پارامتر مهم می باشد. موسسات و شرکت های مختلف بر اساس اتفاقات انفجاری که در سال های اخیر رخ داده است مقادیری را برای فاکتور هم ارزی در نظر گرفته اند. بطور مثال موسسه HSE برای شرایطی که چند ده هزار کیلوگرم هیدروکربن در یک محیط محدود شده با دانسیته موانع بالا آزاد گردد مقدار ۳٪ را پیشنهاد داده است.

یک منبع مهم در گسترش یک انفجار، وجود موانع و محدودیت‌ها بر سر راه حرکت شعله است که باعث افزایش سرعت شعله و فشار می گردد. مدل سازی به روش های چند انرژی و BST بر اساس اغتشاش ایجاد شده در محیط بر اساس وجود موانع و محدودیت هاست. در حالیکه مدل سازی به روش هم ارزیTNT بر اساس مقدار سوخت موجود در ابر هوا- سوخت است. اگر برای مدل سازی یک انفجار از روش چند انرژی و BST استفاده گردد حضور سوخت در ابر تاثیر کمتری نسبت به موانع و محدودیت ها بر سر راه حرکت شعله دارد. بنابراین می توان گفت در انفجار های ابر هوا- سوخت در صورت موجود بودن اطلاعاتی در مورد موانع و محدودیت ها، استفاده از روش های چند انرژی و BST مناسب‌تر است. در غیر این‌صورت روش هم ارزی TNT پیشنهاد می شود.

به طور کلی در استفاده از هریک از روش ها یک سری جزئیات می بایستی در دسترس باشد که با توجه به آنها روش مناسب انتخاب گردد. با بررسی انفجار ابر هوا- سیکلوهگزان در نیروگاه فلیکسبورگ و به دست آوردن فشار توسط روش های هم ارزی TNT، چند انرژی و BST نتایج زیر حاصل گردید:

- حساسیت روش هم ارزی TNT نسبت به تغییرات جرم سوخت، بیشتر در فواصل نزدیک به مرکز انفجار مشاهده می شود. پیش بینی فشار در روش هم ارزی TNT، به میزان زیادی به مقدار فاکتور هم ارزی (به خصوص در فواصل زیر ۵۰ متر از مر کز انفجار) وابسته است. در بین مدل های پیشنهاد شده، به کار بردن مدل هم ارزی TNT زیاد پیشنهاد نمی‌شود زیرا همانطور که ذکر گردید TNT یک ماده منفجره قوی است، در نتیجه انفجارات گازی ضعیف با این روش به خوبی توصیف نمی‌شوند و این روش منجر به پیشگویی بیش از مقدار واقعی اثرات فشاری موج در نواحی نزدیک به منبع می‌شود. مزیت اصلی این روش محاسبات ساده آن است.
- مقدار حجم ابر هوا- سوخت تأثیر زیادی در فشار حاصل از انفجار توسط روش های چند انرژی و BST ندارد. در مقابل واکنش پذیری سوخت و میزان تراکم موانع، تأثیر زیادی در مقادیر فشار پیش بینی شده توسط این دو روش دارد. با افزایش واکنش پذیری سوخت و میزان تراکم موانع، فشار پیش بینی شده با این دو روش افزایش می یابد. مشخص نمودن دقیق اینکه حجم محدود و متراکم دقیقاً از چه چیزهایی تشکیل شده است و به چه صورتی روی شدت و قدرت انفجار تأثیر می گذارد در روش چند انرژی وBST کار ساده‌ای نیست. همچنین انتخاب قدرت اولیه انفجار ابر هوا- سوخت و عدد ماخ سرعت شعله امری مشکل است.
- بطور کلی پیشنهاد می شود در واحدهای صنعتی مخازن نگهداری مواد اشتعال پذیر دور از بقیه تجهیزات و در محیط هایی که درجه بهم فشردگی تجهیزات کم است نصب شوند.

مراجع

[1] Bjerketvedt, D., Roar Bakke, J., and Van Wingerden, K., "*Gas Explosion Handbook*", Christian Michelsen Research, Bergen, Norway, (1990).

[2] Davenport, J., Birtwistle, J., Grossel, S., and Hoffman, P., "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fires & BLEVES", American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, (1994).

[3] Jiang, J., Liu, Z. G., and Kim, A. K., "Comparison of Blast Prediction Models for Vapor Cloud Explosions", Combustion Institute Canada Section, NRCC44715, pp. 23.1-23.6, 13-16 May (2001).

[4] Lea, C.J., and Ledin, H.S., "A Review of the State of the Art in the Gas Explosion Modeling ", Health and Safety Laboratory, SK17-9JN, (2002).

[5] Eggen, J.B.M.M., "GAME: Development of Guidance for the Application of the Multi-Energy Method ", Health and Safety Executive, TNO Prins Maurits Laboratory, Ryswyk Netherlands, (1998).

[۶] محبی نیا، س.،" مطالعه آسیب پذیری در برابر موج انفجار اکسید اتیلن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، (۱۳۸۰).

[7] Tang, M.J., and Baker, Q.A., "A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion", Wilford Baker Engineering, INC., Texas 78209, USA, (1999).

[8] Park, D.J., and Lee, Y. S., "A Comparison on Predictive Models of Gas Explosions", Korean J. Chem. Eng, Vol. 26, No.2, pp. 313-323, (2008).

[9] Appa R., A., "Fuel Air Explosives", Explosives Research & Development Laboratory, Def Sci. J. Vol. 37, pp.23-28, (1987).

[10] "A Comparison of Vapor Cloud Explosion models (Issue 1)", Quest Quarterly, Vol. 4, Quest Consultant Inc., Norman, OK 73069-8069, USA, (1999).

[11] "A Comparison of Vapor Cloud Explosion models (Issue 2)", Quest Quarterly, Vol. 4, Quest Consultant Inc., Norman, OK 73069-8069, USA, (1999).

[12] Hoorelbeke, P., and Mukharror, D., "Mitigation of Vapor Cloud Explosion Effects by Inhibitors", Society of Petroleum Engineers, SPE 123908, Texas 75080, USA, (2009).

[13] Liu, G., Hou, F., Xie, L., Shen, Zh., and Zhou, T., “Experimental Study of Fuel-Air Explosive”, Combustion Explosion and Shock Waves, Vol. 44, issue 2, pp. 213-217, (2007).

[14] Diaz, A., and Fernando, G., “Characteristic Overpressure-Impulse distance Vapor Cloud Explosion Using the TNO multi Energy Model”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 137, pp.734-741, (2006).

[15] Wilkinson, C. R., and Anderson, J. G., “An Introduction to Detonation and Blast for the Non-Specialist”, Defence Science and Technology Organization, Systems Science Laboratory, DSTO-TN-0526, Australia, (2003).

[16] Cardillo, P., "Some Historical Accidental Explosions", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 14, Issue 1, pp. 69-76, (2001).

[17] Ikhan, F., and Abbasi, S.A., "Major Accidents in Process Industries and Analysis of Causes and Consequences", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 12, Issue 6, pp. 361-378, (1999).

[18] Hoorelbeke, P., Bakke, J.R., Renoult, J., and Brewerton, R.W., "Vapor Cloud Explosion Analysis of Onshore Petrochemical Facilities, American Society of Safety Engineers, Middle East Chapter, ASSE-MEC-0306-38, (2006).

فهرست نمادهای انگلیسی

c_P : گرمای ویژه متوسط احتراق

E : انرژی کل

F : کسر اشتعال پذیری

H_f : گرمای احتراق سوخت

H_{TNT} : انرژی حاصل از انفجار TNT

L : گرمای نهان تبخیر سوخت

m : جرم سوخت آزاد شده در محیط

P_o : فشار محیط

R : فاصله از مرکز انفجار

$\overline{R}$: فاصله معادل هاپکینسون

W_f : جرم سوخت موجود در ابر

W_{TNT} : جرم معادل TNT

نمادهای یونانی

α : فاکتور هم ارزی

ΔT : اختلاف دما

Abstract

Fuel-air cloud explosion is one of the most serious threats to chemical and petrochemical industries. The objective of this study is to compare the overpressure, due to a vapor cloud explosion, that is predicted by different models. TNT equivalency, Multi Energy (ME), and Baker-Strehlow-Tang Models are studied. In this work the predictions of the models are compared with observed data for the explosion of Air- cyclohexane cloud in Flixborough plant.This study shows that the TNT equivalency model often overestimates the explosion overpressure near the explosion center. Moreover, the fuel-air cloud volume have minor effect on the overpressure predicted by BST and ME methods, while the reactivity of the mixture and obstacles density have profound effects.
ME and BST models predict approximately similar consequences.