



بررسی اثرات زیست‌محیطی انفجارهای شیمیایی و ارائه راهکارهای متناظر آن با استفاده

از روش دلفی

رضا دسترنج^{*1}

1. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: reza.dastranj@ut.ac.ir

چکیده

انفجارهای شیمیایی به‌عنوان یکی از بحران‌های زیست‌محیطی در صنایع پرخطر، آثار عمیق و گسترده‌ای بر منابع طبیعی، سلامت انسان و تنوع زیستی دارند. هدف این پژوهش، شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از انفجارهای شیمیایی و ارائه راهکارهای کاهش این پیامدها با استفاده از روش دلفی است. در این راستا، دو مرحله نظرسنجی از 15 نفر از نخبگان حوزه محیط‌زیست، ایمنی صنعتی و مدیریت بحران انجام شد. در مرحله نخست، از طریق تحلیل محتوای کیفی، 5 اثر عمده شامل آلودگی هوا، آلودگی آب، آلودگی خاک، کاهش تنوع زیستی و تهدید سلامت انسان شناسایی شد. در مرحله دوم، پرسشنامه‌ای با مقیاس لیکرت طراحی و نظرات نخبگان تحلیل آماری شد. نتایج نشان داد که آلودگی هوا و آب مهم‌ترین اثرات انفجارهای شیمیایی هستند (میانگین بالای 4.6 از 5). همچنین، اقدامات پیشنهادی از جمله فاصله‌گذاری صنایع از مناطق مسکونی، ایجاد سامانه‌های پایش لحظه‌ای آلودگی و آموزش جامعه محلی، بالاترین اولویت را در کاهش اثرات داشتند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای تدوین سیاست‌های ایمنی و زیست‌محیطی در صنایع پرریسک فراهم آورد.

واژگان کلیدی: انفجار شیمیایی، آلودگی زیست‌محیطی، روش دلفی، ایمنی صنعتی، مدیریت بحران.

مقدمه

در عصر صنعتی کنونی، استفاده گسترده از مواد شیمیایی در صنایع مختلف منجر به افزایش خطرات زیست‌محیطی، به‌ویژه در صورت بروز انفجار یا نشت ناگهانی این مواد شده است. انفجارهای شیمیایی می‌توانند موجب آزادسازی مقادیر زیادی از ترکیبات سمی در محیط‌زیست شده و اثراتی مخرب بر سلامت انسان، جانوران، منابع آبی و خاکی و اکوسیستم‌های طبیعی بر جای گذارند (Ganesan et al., 2020). انفجارهای شیمیایی یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین بحران‌هایی هستند که در صنایع حساس و پرخطر نظیر صنایع پتروشیمی، نفت و گاز، و کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی رخ می‌دهند. این انفجارها نه تنها موجب خسارات مالی و جانی گسترده می‌شوند، بلکه آثار مخرب زیست‌محیطی طولانی‌مدتی را نیز بر جای می‌گذارند. آزادسازی ناگهانی مواد شیمیایی سمی به محیط، موجب آلودگی گسترده هوا، آب، و خاک شده و زندگی انسان‌ها، حیوانات و اکوسیستم‌های طبیعی را در معرض تهدید قرار می‌دهد (Zhang et al., 2019). در سال‌های اخیر، حوادثی نظیر انفجار مواد شیمیایی در بیروت لبنان (2020)، توجه جهانی را به ابعاد پنهان و پیچیده این بحران‌ها جلب کرده‌اند. این رخدادها نه تنها با پیامدهای انسانی فاجعه‌آمیز همراه بوده‌اند، بلکه به‌عنوان نمونه‌های بارزی از آسیب‌پذیری جوامع در برابر سوانح تکنولوژیک شناخته می‌شوند (Xu et al., 2021). آلودگی هوا ناشی از گازهای سمی مانند دی‌اکسید نیتروژن و کلرید هیدروژن، آلودگی منابع آبی به واسطه نفوذ مواد سمی، و تهدید تنوع زیستی از جمله اثرات بارز این حوادث هستند.

با توجه به گسترش سریع شهرنشینی و نزدیکی بسیاری از واحدهای صنعتی به مناطق مسکونی، شناسایی دقیق اثرات زیست‌محیطی این انفجارها و طراحی راهکارهای کاهش‌دهنده آن‌ها، ضرورتی انکارناپذیر برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان شهری و مسئولان محیط‌زیست است. از آنجا که اطلاعات دقیق و تجربه‌های میدانی متخصصان و نخبگان در این حوزه ارزش بالایی دارد، استفاده از روش دلفی برای دستیابی به اجماع علمی و شناسایی مؤلفه‌های کلیدی می‌تواند ابزاری مؤثر و معتبر باشد (Okoli and Pawlowski, 2004).



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

در این پژوهش، با بهره‌گیری از دیدگاه نخبگان حوزه محیط‌زیست، ایمنی صنعتی و مدیریت بحران، تلاش شده تا ضمن شناسایی مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی انفجارهای شیمیایی، راهکارهای مناسب برای کاهش این پیامدها نیز استخراج و اولویت‌بندی شود.

آلودگی هوا ناشی از انفجار شیمیایی

در اثر انفجارهای شیمیایی، گازهایی نظیر آمونیاک، کلر، دی‌اکسید نیتروژن و ترکیبات آلی فرار به هوا منتقل می‌شوند. این گازها می‌توانند موجب:

- بروز مشکلات تنفسی، آلرژی و سرطان در انسان شوند (World Health Organization, 2000)
- تخریب لایه اوزون و تولید باران اسیدی شوند (Menz et al., 2004).
- افزایش ذرات معلق و آلودگی طولانی‌مدت در محیط‌های شهری و صنعتی را به دنبال داشته باشند.

آلودگی خاک

مواد شیمیایی منفجر شده اغلب به زمین نفوذ کرده و موجب آلودگی خاک می‌شوند. این آلودگی ممکن است:

- باعث کاهش حاصلخیزی خاک و تخریب ساختار میکروبی آن گردد (Alloway, 2013).
- از طریق گیاهان وارد زنجیره غذایی شود و سلامت موجودات زنده را تهدید کند.
- به آلودگی منابع آب زیرزمینی نیز بینجامد.

آلودگی منابع آبی

انفجار مواد شیمیایی در نزدیکی رودخانه‌ها یا مخازن آب، یا در اثر شستشوی پساب‌های آلوده، می‌تواند باعث شود:

- مواد سمی به منابع آب شرب نفوذ کرده و آن را غیرقابل مصرف کند (Gavrilescu, 2005).
- حیات آبریان به علت کاهش اکسیژن محلول یا سمیت مستقیم به خطر افتد.

تخریب اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی

- وقوع انفجار در مناطق طبیعی یا نزدیک به آن می‌تواند:
- موجب مرگ گسترده حیوانات و گیاهان شود.
- زیستگاه‌ها را تخریب کرده و موجب مهاجرت یا انقراض گونه‌ها گردد (Simberloff, 2000).
- باعث اختلال در زنجیره غذایی شود.

مطالعات موردی

- فاجعه بوپال، هند (1984): نشت گاز متیل ایزوسیانات از یک کارخانه باعث مرگ بیش از 15 هزار نفر و آلودگی آب و خاک در منطقه شد که آثار آن هنوز باقی است (Dhara and Dhara, 2002).
- انفجار بندر بیروت (2020): انفجار ۲۷۵۰ تن نیترات آمونیوم موجب آزادسازی گازهای سمی و ایجاد آلودگی شدید هوایی شد. بررسی‌ها نشان دادند سطح دی‌اکسید نیتروژن تا چند برابر حد مجاز افزایش یافت (El Hajj et al., 2021).
- انفجار پتروشیمی بوعلی سینا (1395): انفجار و آتش‌سوزی گسترده موجب آلودگی هوای ماهشهر و نگرانی از نشت مواد شیمیایی به منابع آبی شد. داده‌های محلی حاکی از افزایش ذرات معلق در هوا بود.



مواد و روش‌ها

با توجه به پیچیدگی و چندبعدی بودن پیامدهای زیست‌محیطی انفجارهای شیمیایی، استفاده از دیدگاه نخبگان و متخصصان حوزه‌های مختلف (محیط زیست، صنایع شیمیایی، ایمنی صنعتی و مدیریت بحران) جهت استخراج عوامل کلیدی و ارائه راهکار، ضروری است. به همین منظور، روش دلفی که بر مبنای جمع‌آوری نظرات نخبگان در چند راند متوالی و دستیابی به اجماع نظری طراحی شده، به عنوان روش تحقیق این مطالعه برگزیده شده است (Unisrd, 2015). هدف روش دلفی در این تحقیق، شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از انفجارهای شیمیایی و همچنین تعیین مؤثرترین راهکارهای پیشگیرانه و مدیریتی برای کاهش اثرات این انفجارها است.

مراحل اجرای روش دلفی

مرحله ۱: شناسایی و انتخاب نخبگان

تعداد ۱۵ نفر از خبرگان با ویژگی‌های زیر انتخاب شدند:

- دکتر یا کارشناسی ارشد در یکی از رشته‌های محیط زیست، مهندسی شیمی، HSE یا مدیریت بحران.
- سابقه کاری مرتبط با صنایع شیمیایی یا فعالیت‌های محیط‌زیستی.
- آشنایی با رخدادهای زیست‌محیطی ناشی از مواد شیمیایی.

مرحله ۲: طراحی پرسشنامه اولیه

پرسشنامه اولیه به صورت باز طراحی شد تا دیدگاه‌های متنوع جمع‌آوری گردد. سؤالات کلیدی عبارت بودند از:

۱. از نظر شما، سه مورد از مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی انفجارهای شیمیایی چیست؟
۲. کدام پیامدها بیشترین تأثیر بلندمدت بر محیط‌زیست دارند؟
۳. چه اقداماتی می‌توانند در پیشگیری از وقوع چنین حوادثی مؤثر باشند؟
۴. کدام اقدامات پس از حادثه می‌توانند اثرات محیطی را کاهش دهند؟

مرحله ۳: تحلیل پاسخ‌های اولیه

پاسخ‌ها با استفاده از تحلیل محتوای کیفی کدگذاری شدند (Rayens and Hahn, 2000). نتایج به پنج دسته اصلی طبقه‌بندی شدند (جدول ۱).

جدول ۱: تحلیل پاسخ‌های اولیه.

درصد موافقت نخبگان	پرتکرارترین	اثرات محیط‌زیستی
86%	آزادسازی گازهای سمی مانند	آلودگی هوا
80%	نشت مواد سمی به رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی	آلودگی آب
73%	رسوب مواد شیمیایی در خاک	آلودگی خاک
67%	مرگ حیوانات و تخریب زیستگاه‌ها	تخریب تنوع زیستی
60%	آلودگی زنجیره غذایی و آب آشامیدنی	تأثیرات بهداشتی غیر مستقیم

مرحله ۴: طراحی پرسشنامه ثانویه (بسته با مقیاس لیکرت) (جدول ۲)

در این مرحله، یافته‌های اولیه تبدیل به جملات قابل رتبه‌بندی با مقیاس لیکرت (از 1=کاملاً مخالف تا 5=کاملاً موافق) شدند (Hsu and Sandford, 2007).



جدول ۲: پرسشنامه ثانویه.

ردیف	گزاره	مقیاس پاسخ‌دهی
1	انفجارهای شیمیایی عمدتاً باعث آلودگی شدید هوا می‌شود	1 2 3 4 5
2	آلودگی منابع آبی، یکی از اثرات بلندمدت انفجارهای شیمیایی است	1 2 3 4 5
3	مرگ و مهاجرت گونه‌های جانوری از پیامدهای مهم زیست‌محیطی است	1 2 3 4 5
4	فاصله‌گذاری صنایع شیمیایی از مناطق مسکونی یکی از بهترین راهکارهاست	1 2 3 4 5
5	پایش لحظه‌ای آلودگی هوا در مناطق صنعتی، راهکار مؤثری برای مدیریت بحران است	1 2 3 4 5

مرحله ۵: تحلیل آماری پاسخ‌های ثانویه

برای تحلیل پاسخ‌ها از میانگین، میانه و انحراف معیار استفاده شد (Skulmoski et al., 2007). در مواردی که میانگین پاسخ‌ها بالاتر از 4.0 و انحراف معیار کمتر از 0/8 بود، اجماع نظر بین نخبگان حاصل شده تلقی گردید (جدول 3).

جدول 3: مقدار میانگین و انحراف معیار گزاره‌ها.

گزاره	میانگین	انحراف معیار
انفجارها موجب آلودگی هوا می‌شوند	4/73	0/52
پایش لحظه‌ای مؤثر است	4/53	0/67
مرگ گونه‌ها پیامد اصلی است	3/87	1/1

نتایج

پس از گردآوری و تحلیل پاسخ‌های 15 نخبه، اثرات زیست‌محیطی انفجارهای شیمیایی در قالب 5 دسته کلیدی زیر طبقه‌بندی شدند جدول 4):

جدول 4: اثرات زیست محیطی.

اثر زیست‌محیطی	توضیح متخصصان	تعداد متخصصان
آلودگی هو	آزادسازی گازهای سمی مانند پس از انفجار	13
آلودگی آب	نفوذ مواد شیمیایی و هیدروکربن‌ها به سفره‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها	12
آلودگی خاک	نشست ذرات شیمیایی بر خاک و کاهش کیفیت زیستی آن	11
تخریب تنوع زیستی	مرگ جانوران، پرندگان و گیاهان در اثر تماس مستقیم	10
تأثیرات غیرمستقیم بر سلامت انسان	آلودگی زنجیره غذایی، بروز بیماری‌های تنفسی و سرطانی	9



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

همچنین، راهکارهای مقابله نیز توسط نخبگان پیشنهاد شد. پر تکرارترین اقدامات پیشنهادی عبارت بودند از:

- فاصله گذاری صنایع شیمیایی از مناطق مسکونی
- ایجاد سامانه های هشدار سریع و مانیتورینگ آلودگی
- آموزش کارکنان و مردم پیرامونی
- اصلاح استانداردهای ایمنی صنعتی

در مرحله بعدی، گزاره هایی بر مبنای نتایج مرحله اول طراحی شدند و نخبگان آن ها را در مقیاس لیکرت (از 1=کاملاً مخالف تا 5=کاملاً موافق) ارزیابی کردند (جدول 5).

جدول 5: نتایج آماری گزاره ها.

گزاره	میانگین نمرات	انحراف معیار	میانگین نمرات	سطح اجماع
انفجارهای شیمیایی معمولاً موجب آلودگی شدید هوا می شوند.	4/73	0/52	4/73	اجماع قوی
نشت مواد شیمیایی به آب های سطحی و زیرزمینی از اثرات مهم است.	4/6	0/61	4/6	اجماع قوی
انفجارهای شیمیایی می توانند باعث مرگ و مهاجرت گونه های جانوری شوند.	4/27	0/88	4/27	اجماع متوسط
فاصله گذاری صنایع شیمیایی از مناطق مسکونی اقدامی مؤثر است.	4/67	0/59	4/67	اجماع قوی
استفاده از سیستم پایش لحظه ای برای تشخیص سریع آلودگی ها لازم است.	4/53	0/67	4/53	اجماع متوسط
آموزش ساکنان مناطق اطراف صنایع در کاهش اثرات زیست محیطی مؤثر است.	4/4	0/72	4/4	اجماع متوسط

اولویت بندی پیامدهای زیست محیطی به صورت جدول 6 آمده است.

جدول 6: اولویت بندی پیامدهای زیست محیطی.

رتبه	اثر زیست محیطی	(MI ± SD) شاخص اجماع
1	آلودگی هوا	4/73 ± 0/52
2	آلودگی آب	4/60 ± 0/61
3	آلودگی خاک	4/27 ± 0/75
4	تهدید تنوع زیستی	4/27 ± 0/88
5	اثرات سلامت انسان	4/13 ± 0/84



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

همچنین اولویت‌بندی اقدامات پیشنهادی برای کاهش اثرات به صورت جدول ۷ آمده است.

جدول ۷: اولویت‌بندی اقدامات پیشنهادی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی.

رتبه	اقدام پیشنهادی	میانگین نظر نخبگان
1	فاصله‌گذاری مکانی مناسب صنایع خطرناک	4/67
2	پایش لحظه‌ای آلودگی‌های زیست‌محیطی	4/53
3	آموزش کارکنان و جامعه محلی	4/40
4	به‌روزرسانی استانداردهای ایمنی	4/33

نتیجه‌گیری

روش دلفی نشان داد که نخبگان حوزه محیط زیست و ایمنی صنعتی بر این باورند که آلودگی هوا و آب، از مهم‌ترین پیامدهای انفجارهای شیمیایی هستند که هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت آسیب‌زا است. اقدامات ساختاری مانند فاصله‌گذاری مکانی صنایع، سیستم‌های پایش مستمر و آموزش‌های ایمنی بیشترین توافق را برای کاهش اثرات دارند. این یافته‌ها پایه‌ای برای تدوین سیاست‌های ایمنی ملی، مقررات محیط‌زیستی و استراتژی‌های مدیریت بحران فراهم می‌کنند.

منابع

- Alloway, B. J., 2013.** Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science and Business Media.
- Dhara, V. R. and Dhara, R., 2002.** The Union Carbide disaster in Bhopal: a review of health effects. Archives of Environmental Health, 57(5): 391–404.
- El Hajj, S., Khalaf, L. and Saliba, N. A., 2021.** Air pollution after the Beirut explosion: A toxic legacy. Environmental Research, 197: 111108.
- Ganesan, K., Raza, S. K. and Vijayaraghavan, R., 2020.** Chemical Warfare Agents. Elsevier.
- Gavrilescu, M., 2005.** Fate of pesticides in the environment and its bioremediation. Engineering in Life Sciences, 5(6): 497–526.
- Hsu, C. C. and Sandford, B. A., 2007.** The Delphi technique: making sense of consensus. Practical Assessment, Research, and Evaluation, 12(10): 1–8.
- Menz, F. C. and Seip, H. M., 2004.** Acid rain in Europe and the United States: an update. Environmental Science and Policy, 7(4): 253–265.
- Okoli, C. and Pawlowski, S. D., 2004.** The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. Information and Management, 42(1): 15–29.
- Rayens, M. K. and Hahn, E. J., 2000.** Building consensus using the policy Delphi method. Policy, Politics and Nursing Practice, 1(4): 308–315.
- Simberloff, D., 2000.** Global climate change and introduced species in United States forests. Science of the Total Environment, 262(3): 253–261.
- Skulmoski, G. J., Hartman, F. T. and Krahn, J., 2007.** The Delphi method for graduate research. Journal of Information Technology Education: Research, 6: 1–21.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

UNISDR, 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. United Nations.

World Health Organization, 2000. Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. WHO Regional Publications.

Xu, M., Huang, R. and Liu, Y., 2021. Urban vulnerability to chemical explosions: Insights from the 2020 Beirut disaster. *Safety Science*, 136: 105134.

Zhang, Y., Wang, Y. and Li, J., 2019. Environmental consequences of chemical accidents: A review of recent incidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 58: 71–80

Assessing the Environmental Impacts of Chemical Explosions and Proposing Corresponding Solutions Using the Delphi Method

Reza Dastranj^{1*}

1. M.Sc. Graduate in Natural Disaster Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding author: reza.dastranj@ut.ac.ir

Abstract

Chemical explosions, as one of the major environmental crises in high-risk industries, have profound and widespread impacts on natural resources, human health, and biodiversity. This study aims to identify and prioritize the most significant environmental consequences of chemical explosions and to propose mitigation strategies using the Delphi method. To this end, two rounds of surveys were conducted with 15 experts in the fields of environmental science, industrial safety, and crisis management. In the first stage, through qualitative content analysis, five major impacts were identified: air pollution, water pollution, soil contamination, loss of biodiversity, and threats to human health. In the second stage, a Likert-scale questionnaire was designed, and the experts' responses were statistically analyzed. The results indicated that air and water pollution are the most critical consequences of chemical explosions (with mean scores above 4.6 out of 5). Furthermore, the proposed measures—including distancing industrial sites from residential areas, implementing real-time pollution monitoring systems, and educating the local community—were ranked as top priorities for impact reduction. The findings of this study provide a solid foundation for developing safety and environmental policies in high-risk industries.

Keywords: Chemical Explosion, Environmental Pollution, Delphi Method, Industrial Safety, Crisis Management.