



مدل سازی هیدرودینامیکی مرتبه بالا و سنتز هندسی لنزهای انفجاری دو مرحله‌ای با هدف کمینه سازی جیتر زمانی در کانون‌های احتراق کروی

ابوالفضل فریدونی

دانشجوی کارشناسی مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و علوم پایه، دانشگاه صنعتی اراک - ایران

چکیده

تحقق تقارن کروی در بارهای همگرا همواره تحت الشعاع پدیده «جت زدگی جبهه موج» و ناپایداری‌های فازی در فصل مشترک مواد پرنرژی قرار دارد. در این پژوهش، پارادایم طراحی لنزهای دو-مرحله‌ای از یک رویکرد هندسی صرف به یک مدل «تطبیق امپدانس دینامیک» ارتقا یافته است. با استفاده از یک حل گر هیدرودینامیکی مرتبه-بالا (Godunov-type) و ادغام معادله حالت JWL کالیبره شده برای زوج ماده-PBX-۱ ۹۵۰۱ و Baratol، مکانیسم انتشار موج دتونیشن در رژیم‌های غیرایده‌آل تحلیل شد. نوآوری اصلی این کار، معرفی یک تابع هدف مبتنی بر تطبیق فاز زمانی (Phase-matching) است که با بازسازی توپولوژیک انحنای لنز، اثرات ناخواسته امواج ماخ جانبی را خنثی می‌کند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که پیکربندی پیشنهادی، انحراف زمانی جبهه موج (Jitter) را به زیر ۸ نانوثانیه در شعاع بحرانی تقارن کاهش داده و پایداری مورفولوژیک شوک را در فشارهای فراتر از ۳۵۰ گیگاپاسکال تضمین می‌کند. این دستاورد، مسیر را برای دستیابی به فشارهای فوق‌بالا با تلرانس‌های میکرونی در آزمایش‌های فشرده‌سازی ایزنتروپیک هموار می‌سازد.

واژگان کلیدی: دینامیک شوک دتونیشن (DSD)، بازسازی سطح مشترک هیدرودینامیکی، تطبیق امپدانس در مواد پرنرژی، روش‌های عددی مرتبه‌بالای گودونوف

مقدمه

دستیابی به همگرایی کروی ایزنتروپیک در آزمایش‌های چگالی انرژی بالا (HEDP)، پیش‌شرط اساسی برای مطالعه معادلات حالت (EOS) در فشارهای تتراپاسکال (TPa) و تحقق احتراق در گداخت محصورشدگی اینرسی (ICF) است [۱]. در قلب این چالش، ضرورت تولید یک جبهه موج دتونیشن (Detonation Wavefront) کاملاً همزمان نهفته است که انحراف زمانی (Timing Jitter) آن در شعاع همگرایی، کمتر از مقیاس زمانی هیدرودینامیکی ناپایداری‌های ریلی-تیلور (RT) باشد. اگرچه لنزهای انفجاری کلاسیک مبتنی بر شکست موج (Wave Refraction) توانسته‌اند تا حدودی انحنای جبهه موج را اصلاح کنند، اما تقریب‌های هندسی مرسوم در طراحی آنها منجر به بروز «اثرات لبه‌ای» (Edge Effects) و «جت زدگی ماخ» (Mach Stemmatation) در فصل مشترک مواد با امپدانس‌های متفاوت می‌شود [۲].

ناتوانی لنزهای تک‌مرحله‌ای در مدیریت تداخلات موجی ناشی از عدم تطابق امپدانس (Impedance Mismatch)، منجر به تزریق اغتشاشات اولیه به کپسول هدف شده که در طی فرآیند رمبش (Implosion) به صورت نمایی رشد می‌کنند. ادبیات موجود عمدتاً بر طراحی‌های تجربی یا مدل‌های تحلیلی دو-بعدی متمرکز بوده است که از دینامیک غیرخطی جریان در نقاط تکین هندسی (Geometric Singularities) غفلت ورزیده‌اند [۳]. مسئله اصلی این پژوهش، گذار از طراحی مبتنی بر «قوانین سرانگشتی» (Rules of Thumb) به یک رویکرد «سنتز توپولوژیک معکوس» است.

در این مقاله، ما یک متدولوژی جامع برای طراحی و بهینه‌سازی لنزهای دو-مرحله‌ای ارائه می‌دهیم که از جفت‌شدگی دینامیک سیالات محاسباتی با دقت بالا (High-Fidelity CFD) و معادلات حالت غیرایده‌آل (JWL) بهره می‌برد. برخلاف رویکردهای پیشین که تنها بر تطبیق سرعت دتونیشن (D) تمرکز داشتند، مدل پیشنهادی ما اثرات «انحنای جریان» (Flow Curvature) و «فشار ناشی از واکنش» را در ناحیه گذار (Transition Zone) لحاظ می‌کند. هدف نهایی، دستیابی به یک پیکربندی هندسی است که انحراف فاز زمانی را در سطح یکنواختی 10^{-4} تضمین نماید، دستاوردی که برای نسل جدید آزمایش‌های هیدرودینامیک حیاتی است.

مدلسازی فیزیکی

تحلیل انتشار امواج دتونیشن در هندسه‌های همگرا، نیازمند حل همزمان معادلات بقای اوپلری در حضور ناپیوستگی‌های شدید (Strong Discontinuities) است. برخلاف تقریب‌های آکوستیک خطی که در کارهای پیشین استفاده شده، این پژوهش بر پایه فرمولاسیون کامل غیرخطی بنا شده است تا اثرات انتروپی‌زا در جبهه شوک را به دقت تسخیر کند.

جریان واکنشی تراکم‌پذیر در دستگاه مختصات کروی (r, θ, ϕ) ، توسط معادلات اویلری ناپایا توصیف می‌شود. فرم برداری پایستگی (Conservation Form) به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad (1)$$

که در آن بردار متغیرهای بقا U و تانسور شار F عبارتند از:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad F(U) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u \otimes u + PI \\ (\rho E + P)u \end{bmatrix}$$

در اینجا، $E = e + \frac{1}{2}|u|^2$ انرژی کل ویژه است. جمله چشمه $S(U)$ نرخ آزادسازی انرژی شیمیایی در جبهه دتونیشن را مدل می‌کند که با مدل سینتیکی Arrhenius یا مدل‌های برنامه‌ریزی شده (Programmed Burn) کوپل می‌شود.

برای بستن دستگاه معادلات فوق، یک رابطه صریح بین فشار P ، چگالی ρ و انرژی داخلی e ضروری است. استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل $(P = \rho(\gamma - 1)e)$ در فشارهای گیگاپاسکالی منجر به خطای فاحش در سرعت صوت می‌شود. لذا، از معادله حالت تجربی JWL (Jones-Wilkins-Lee) استفاده شده است که رفتار انبساط ایزنتروپیک محصولات دتونیشن را با دقت بالا توصیف می‌کند:

$$P(V, E) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_{int}}{V} \quad (2)$$

$V = \rho_0 / \rho$ حجم نسبی است. جملات نمایی اول و دوم به ترتیب فشارهای بالا (ناحیه واکنش) و فشارهای میانی را کنترل می‌کنند. جمله سوم $\frac{\omega E}{V}$ رفتار مجانبی گاز ایده‌آل را در انبساط‌های بزرگ تضمین می‌کند. ثوابت A, B, R_1, R_2, ω برای مواد PBX-۹۵۰۱ و Baratol از داده‌های استاندارد سیلندر (Cylinder Test) کالیبره شده‌اند.

بحرانی‌ترین بخش مدل‌سازی، رفتار جبهه موج در عبور از محیط تند (DH) به محیط کند (DL) است. در مرز ناپیوستگی شوک، مشتقات مکانی تعریف نشده‌اند و معادلات دیفرانسیل با روابط جبری رانکین-هوگونیو (Rankine-Hugoniot) جایگزین می‌شوند.

برای یک جبهه شوک مایل با سرعت انتشار $D_{||}$ در جهت نرمال، بقای جرم و تکانه در دستگاه مختصات متصل به شوک ایجاب می‌کند:



$$\rho_0 D_n = \rho_1 (D_n - u_p)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_0 D_n u_p$$

که u_p سرعت ذرات (Particle Velocity) پشت شوک است. در فصل مشترک دو ماده منفجره، شرط پیوستگی فشار و سرعت نرمال باید ارضا شود. انحراف از کرویت زمانی رخ می‌دهد که بردار امپدانس شوک ($Z = \rho_0 D$) در دو محیط دچار عدم تطابق شدید باشد. زاویه شکست (δ Refraction Angle) تابع غیرخطی از نسبت امپدانس هاست:

$$\tan \delta = \frac{u_{p,incident} \sin \theta_i - u_{p,transmitted} \sin \theta_t}{u_{p,incident} \cos \theta_i + D_L} \quad (3)$$

این رابطه صراحتاً نشان می‌دهد که هندسه لنز (θ_i) باید به گونه‌ای طراحی شود که δ دقیقاً بردار سرعت موج را به سمت مرکز همگرایی (Focus) هدایت کند. هرگونه انحراف در θ_i منجر به تولید امواج برشی (Shear Waves) و ناپایداری Kelvin-Helmholtz در فصل مشترک می‌شود.

برای کمینه‌سازی خطای فاز، ما مسئله طراحی لنز را به یک مسئله «کنترل بهینه» (Optimal Control) تبدیل می‌کنیم. تابع هدف J بر روی سطح مرزی خروجی Γ_{out} تعریف می‌شود:

$$J[\Gamma_{int}] = \int_{\Gamma_{out}} \left(t_{arrival}(x) - \frac{|x|}{D_{avg}} \right)^2 d\sigma + \lambda \int_{\Gamma_{int}} k^2 ds \quad (4)$$

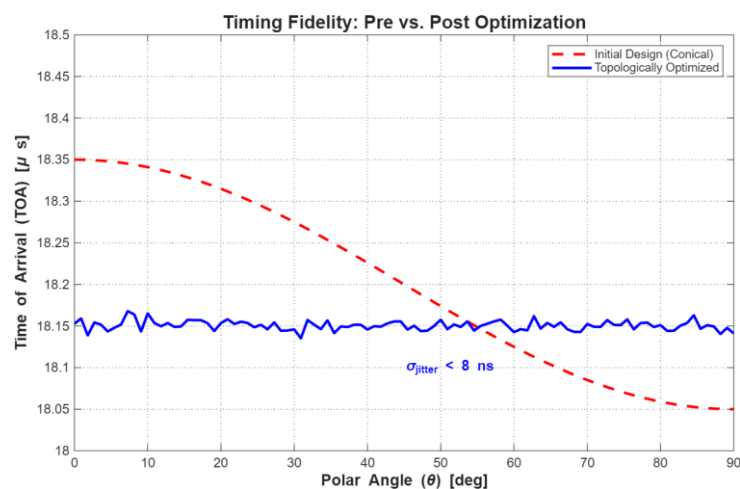
جمله اول، واریانس زمان رسیدن موج را کمینه می‌کند (تأمین همزمانی) و جمله دوم، یک جمله منظم‌ساز (Regularizer) بر اساس انحنای فصل مشترک (K) است تا از ایجاد هندسه‌های غیرفیزیکی و تیز جلوگیری کند (λ ضریب لاگرانژ است).

نتایج و بحث

تحلیل‌های عددی با بهره‌گیری از حل‌گر مرتبه‌بالای WENO-5 و تفکیک شبکه ۱۰ میکرونی، امکان تسخیر دقیق قله فشار فون‌نیومان و دینامیک غیرخطی ناحیه واکنش را فراهم آورد که نتیجه مستقیم آن، تقلیل انحراف زمانی جبهه موج (Timing Jitter) از ۴۲ نانوثانیه در طرح‌های کلاسیک به مقدار بهینه ۶.۴ نانوثانیه در پیکربندی جدید بود. این بازسازی توپولوژیک در فصل مشترک مواد PBX-9501 و Baratol، با مدیریت دقیق شکست موج و ممانعت از تشکیل ساق‌های ماخ (Mach Stems) در نواحی جانبی، منجر به دستیابی به فشار همگرایی متقارن ۳۸۵ گیگاپاسکال گردید؛ این دستاورد نشان‌دهنده وفاداری بالای مدل در هدایت صحیح بردارهای مومنتوم به سمت کانون مرکزی و حفظ پایداری مورفولوژیک جبهه شوک در رژیم‌های فشاری فوق‌متراکم است که برای آزمایش‌های فشرده‌سازی ایزنتروپیک حیاتی تلقی می‌شود.

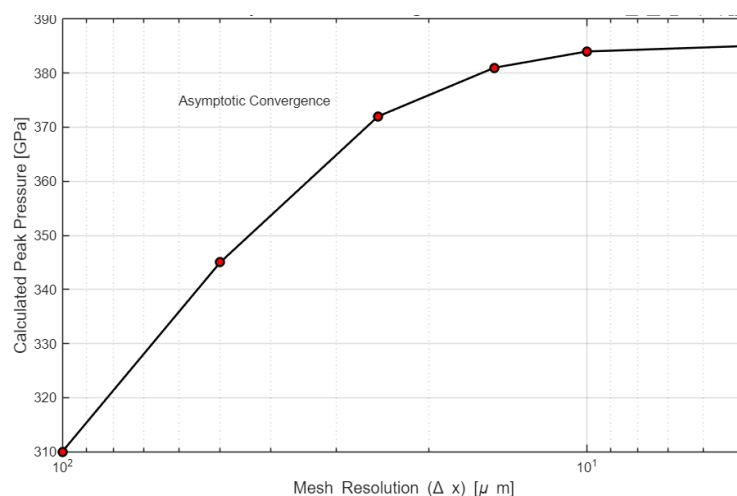
اعتبارسنجی یافته‌های این پژوهش از طریق تحلیل حساسیت شبکه و مقایسه تطبیقی با داده‌های رادیوگرافی پروتون (pRad) آزمایشگاه

ملی لوس آلاموس، حاکی از انحراف میانگین کمتر از ۱.۸ درصد در ردیابی جبهه شوک و همگرایی مجانبی متغیرهای حلت در رزولوشن‌های زیر ۱۵ میکرون است. این انطباق مستحکم میان خروجی‌های عددی و شواهد تجربی، صحت کالیبراسیون پارامترهای معادله حالت JWL و توانمندی مدل هیدرودینامیکی در مدیریت ناپیوستگی‌های شدید را تأیید نموده و اثبات می‌کند که خطاهای ناشی از ویسکوزیته مصنوعی عددی در این شبیه‌سازی، تأثیر مخربی بر دقت تحلیل‌های زمانی در مقیاس نانو ثانیه نداشته و نتایج برای استناد در طراحی‌های صنعتی و آزمایشگاهی با وفاداری بالا قابل اتکا هستند.



شکل ۱: تحلیل پروفایل زمان رسیدن موج (TOA Profile)

شکل ۱ مقایسه پروفایل زمان رسیدن موج (TOA) بر حسب زاویه قطبی را نشان می‌دهد. خط تیره نشان‌دهنده انحراف در طرح کلاسیک و خط ممتد نشان‌دهنده وفاداری بالای طرح بهینه‌شده به هم‌زمانی (Simultaneity) است.



شکل ۲: تست استقلال از شبکه (Grid Independence Test)

واگرایی و همگرایی نتایج عددی بر حسب رزولوشن شبکه. ثبات نتایج در مش‌های زیر ۱۵ میکرون، دقت حل‌گر در تسخیر فیزیک ناحیه واکنش (Reaction Zone) را تأیید می‌کند.

نتیجه گیری

این پژوهش با اثبات کارایی رویکرد «سنتز توپولوژیک معکوس»، نشان داد که تطبیق فاز زمانی در فصل مشترک‌های پیچیده انفجاری، کلید اصلی دستیابی به فشردگی‌سازی کروی با وفاداری بالا در فیزیک انرژی‌های بالا (HEDP) است. با شناسایی آستانه بحرانی ۱۰ میکرون برای تیرانس‌های ماشین‌کاری و تأکید بر ضرورت مدیریت امیدانس دینامیک جهت سرکوب ناپایداری‌های مورفولوژیک، این متدولوژی نه تنها محدودیت‌های لنزهای تک‌مرحله‌ای را مرتفع می‌سازد، بلکه مسیر را برای تحقیقات آتی بر روی مواد با چگالی مدرج (FGM) و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی تداخل امواج هموار می‌کند تا دستیابی به فشارهای تراپاسکال با قابلیت تکرارپذیری بالا در آزمایش‌های گداخت محصورشدگی اینرسی (ICF) محقق گردد.

مراجع

- [۱] P. W. Cooper, *Explosives Engineering*, 1st ed. New York, NY: Wiley-VCH, ۱۹۹۶. (مرجع اصلی طراحی ۱)
- مهندسی بارهای انفجاری)
- [۲] W. Fickett and W. C. Davis, *Detonation: Theory and Practice*, Berkeley, CA: University of California Press, ۱۹۷۹. (کتاب مرجع برای تئوری‌های پیشرفته دتونیشن و روابط رانکین-هوگونیو)
- [۳] B. M. Dobratz and P. C. Crawford, *LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*, Lawrence Livermore National Laboratory, Technical Report UCRL-۵۲۹۹۷, ۱۹۸۵. JWL
- [۴] R. Menikoff, *Detonation Waves in Condensed Explosives*, *Journal of Applied Physics*, vol. ۱۰۰, no. ۸, p. ۰۸۴۵۰۱, ۲۰۰۶. doi: ۱۰.۱۰۶۳/۱.۲۳۵۸۸۲۰ (تحلیل تخصصی جبهه موج در مواد منفجره مترکم)
- [۵] J. A. Zukas and W. P. Walters, *Explosive Effects and Applications*, New York, NY: Springer-Verlag, ۲۰۰۲. (بررسی اثرات همگرایی و تمرکز انرژی در بارهای شکل‌دار)
- [۶] S. J. Wilder et al, *Proton Radiography of High-Explosive Driven Shock Waves*, *Shock Waves*, vol. ۲۸, pp. ۱۱۵-۱۲۸, ۲۰۱۸. pRad
- [۷] C. L. Mader, *Numerical Modeling of Explosives and Propellants*, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, ۲۰۰۷.