

تأثیر مدل تلاطم غیرخطی $k-\epsilon$ بر رفتار اسپری در جریان دو فازی

داود دومیری گنجی (دانشجوی دکتری)

حسن خالقی (استادیار)

بخش مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس

در این نوشتار برای اولین بار، جریان دوفازی گاز-مایع، همراه با اعمال مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته است. اسپری با سرعت بالا در محیط گازی پاشیده می‌شود. جریان اسپری محیط گازی را تحت تأثیر قرار داده و آن محیط را متلاطم می‌کند. شدت تلاطم متأثر از حرکت قطره و سرعت آن است. در این مطالعه مدل جدید تلاطمی $k-\epsilon$ غیرخطی سوگا^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های درجه دو و درجه سه $k-\epsilon$ غیرخطی به‌طور هم‌زمان بررسی شده و نتایج حاصل از آن با مدل تلاطمی $k-\epsilon$ استاندارد مقایسه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل $k-\epsilon$ غیرخطی در مناطقی از محفظه که جریان آن چرخشی باشد، به دلیل در نظر گرفتن آهنگ چرخش، بهتر از مدل $k-\epsilon$ استاندارد عمل می‌کند و نتایج آن به نتایج تجربی نزدیکتر است. در این نوشتار، تأکید اصلی بر مقایسه بین دو مدل تلاطم $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ غیرخطی، و تأثیر آنها بر میزان تبخیر و نفوذ قطرات است. نتایج نشان می‌دهد که توانمندی مدل $k-\epsilon$ غیرخطی زمانی که گرادیان سرعت در جهت‌های محوری و شعاعی تغییرات شدید دارد، بیش از مدل خطی است. با مدل غیرخطی می‌توان جریان در مجاورت مرز، گوشه‌های محفظه و اطراف اسپری را بهتر تحلیل کرد. همچنین در این پژوهش نشان داده می‌شود که مدل‌های $k-\epsilon$ غیرخطی درجه دو و درجه سه از مدل استاندارد بهتر عمل کرده و نتایج به دست آمده از مدل $k-\epsilon$ غیرخطی درجه سه به نتایج تجربی نزدیکتر است.

مقدمه

است که برای طراحی بهتر موتورهای دیزلی باهدف افزایش عملکرد موتور و کاهش آلودگی‌های ناشی از گازهای خروجی، ضرورت می‌یابد.

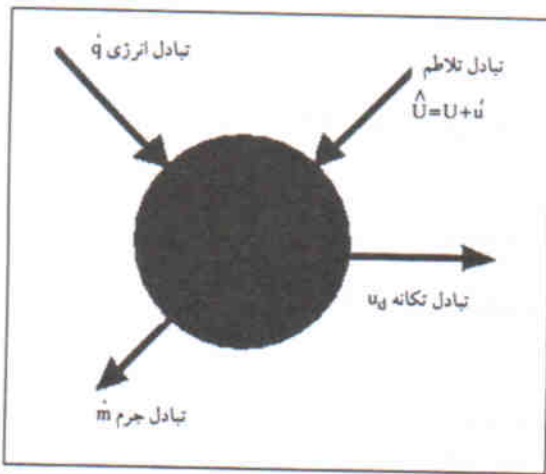
مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی که ابتدا توسط اسپیزاله^۲ ابداع شد برای سطح صاف به کار رفت.^[۱] سپس مدل تلاطم غیرخطی توسط سوگا گسترش یافت.^[۲] اخیراً نیز مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی توسط بهزادی و واتکینز^۳ به موتورهای پیستونی اعمال شد.^[۳] همچنین مدل‌سازی عددی اسپری مایع در موتور دیزل قبلاً توسط واتکینز انجام شده است.^[۴] محاسبات به صورت جریان دو فازی گاز و مایع^۵ توسط گازمن^۶ آغاز شد^[۵] که منجر به کد رایانه‌ی EPISO شد.^[۶] مدل‌سازی جریان چندفازی اسپری دیزل، اخیراً نیز توسط برگ^۸ مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۷] از آنجا که در محفظه‌ی احتراق، هم شدت تلاطم بالا است و هم جریان دو فازی از اهمیت ویژه برخوردار است، مدل تلاطمی که در محفظه بهتر عمل کند و زوایای مختلف جریان دوفازی را نیز لحاظ نماید موفق‌تر است.

در این راستا مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی سوگا که نسبت به مدل $k-\epsilon$ استاندارد از مزیت مدل‌سازی آهنگ چرخش جریان برخوردار است، مورد استفاده قرار گرفته است.^[۲] در این مدل اثر تلاطم فاز گاز بر روی قطرات توسط نوسانات میدان سرعت (u' و v') در معادلات

بازده موتور به میزان تبخیر و نفوذ^۲ اسپری در محیط گازی بستگی دارد و میزان تبخیر اسپری نیز با شدت تلاطم^۳ رابطه‌ی مستقیم دارد. بنابراین بررسی تلاطم در محفظه احتراق از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. از این رو، مدل‌هایی که شدت تلاطم را با دقت بیشتری محاسبه می‌کنند، مناسب‌ترند. به عقیده محققان مدل $k-\epsilon$ غیرخطی یکی از مدل‌های مهمی است که قدرت مانور بالا دارد.^[۱]

از طرفی فرایند اسپری در صنعت کاربرد گسترده‌ی دارد، به طوری که کاربرد آن را در آنژکتور ماشین‌های دیزلی و بنزینی و کوره‌های صنعتی می‌توان مشاهده کرد. با توجه به گستردگی این فرایند و استفاده از آن در صنعت، خصوصاً در طراحی موتور دیزل، شناخت دقیق فرایند کاملاً ضروری است. در این راستا، و به منظور دستیابی به روش‌های تجربی و عددی برای پیش‌بینی فرایند اسپری مایع محققان تلاش‌های مستمری انجام داده‌اند.

فرایند اصلی اسپری مشتمل است بر تجزیه یا پودر شدن سوخت مایع، برای تولید قطرات کوچک به منظور افزایش مساحت سطح سوخت تریق شده. این عمل باعث افزایش مقادیر انتقال گرما، جرم و شدت تلاطم در طی فرایند تبخیر و نفوذ اسپری می‌شود. این تحقیق به منظور آنالیز کامل حرکت شاره و رفتار اسپری در محفظه‌ی احتراق



شکل ۲. تبادل جرم، تکانه، انرژی و حرکات تلاطمی بین فاز مایع با فاز گاز.

شکل ۲. تبادل جرم، تکانه، انرژی و حرکات تلاطمی بین فاز مایع با فاز گاز. (۱ bar = 10⁵ Pa) و نسبت طول به قطر آن ۳/۶ است. با توجه به اینکه قطر متوسط قطرات بسیار کوچک (حدود ۲۵ میکرومتر) و سرعت حرکت آنها بسیار بالا (در محدوده ۱۲۰ الی تا ۲۲۰ متر بر ثانیه) است، نفوذ فاز مایع در فاز گاز بسیار زیاد بوده و آن محیط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این حرکت اسپری، میدان تلاطم شدیدی همراه با گرادیان سرعت بسیار بالا ایجاد می‌کند. برای بررسی جزئیات حرکت، دقت بیشتر و کاهش حجم محاسبات، فرض می‌شود که میدان حل دارای تقارن محوری است (شکل ۱).

از طرفی قطرات دارای سازوکارهایی با محیط اطراف هستند که فرایند آنها شامل: تبادل تکانه، جرم، انرژی و حرکات تلاطمی است. این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است.

معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر مسئله عبارت‌اند از: معادلات فاز گاز^{۱۵} و معادلات فاز قطره^{۱۶} که به ترتیب در دو دیدگاه اویلری و لاگرانژی بحث می‌شوند.

معادلات فاز گاز

معادلات حاکم بر فاز گاز شامل: معادلات بقا جرم، تکانه، انرژی، تلاطم و کسر جرمی بخار سوخت بوده که در مختصات قطبی به صورت عمومی زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\theta u\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma\rho\theta v\phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma\phi\theta \frac{\partial}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\Gamma\Gamma\phi\theta \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] + \theta S_{\phi d} + S_{\phi} \quad (1)$$

در این رابطه S_{ϕ} و $\Gamma\phi$ به ترتیب ضریب نفوذ و جمله چشمه فاز گاز هستند که مقادیر آنها براساس نوع معادله (پیوستگی، تکانه، انرژی،

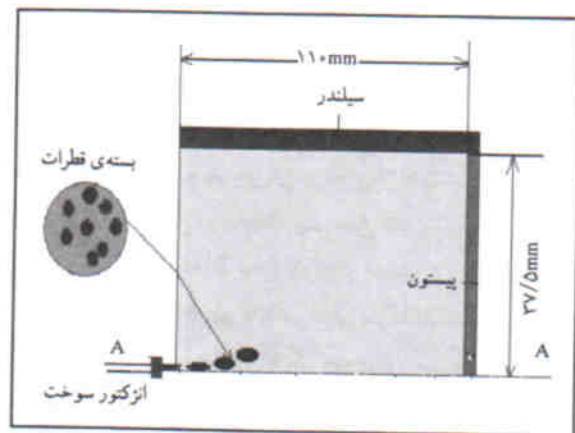
حرکت قطرات منظور می‌شود. این اثر توسط روش تصادفی^۹ که به وسیله گانزالز^{۱۰} و گاسمن ارائه شده است، مدل می‌شود.^[۸] در این روش فرض می‌شود که اغتشاشات همسانگرد^{۱۱} بوده و توزیع لحظه‌ی گاز از توزیع احتمالی گاوسی^{۱۲} پیروی می‌کند. از طرفی سرعت افت و خیز، تابعی از سازوکارهای نفوذ قطرات در فاز گاز است. به طوری که زمان این سازوکارها، تابعی از مقادیر عمرگردابه^{۱۳} و اندازه مشخصه گردابه^{۱۴} است، این پارامترها (عمر گردابه و اندازه مشخصه گردابه) شدیداً به انرژی جنبشی تلاطم، "k" و آهنگ استهلاک آن، "ε" وابسته‌اند. پس مدلی موفق تر است که بتواند مقادیر k و ε را دقیق تر محاسبه کند. در این راستا مدل k-ε غیرخطی یکی از مدل‌های مهمی است که گرادیان سرعت و آهنگ چرخش را بهتر بیان می‌کند^[۱۱]، بنابراین استفاده از این مدل ضروری به نظر می‌رسد.

در مدل تلاطم k-ε غیرخطی که برای موتورهای پیستونی اعمال شده^[۱۳] اثر اسپری (فاز مایع) لحاظ نشده و فقط جریان فاز گاز بررسی شده است. همچنین در محاسبات برگ که در جریان دوفازی، اعمال شده است^[۱۷] مدل تلاطم k-ε غیرخطی استفاده نشده است. لذا در این تحقیق برای اولین بار دو جریان دوفازی مدل k-ε غیرخطی به طور همزمان استفاده شده است.

در خاتمه، نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

هندسه مسئله

حرکت و رفتار اسپری در محفظه‌ی به قطر دهانه‌ی ۷/۵ و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر بررسی می‌شود (شکل ۱). در این مدل‌سازی فرض شده است که سوزن انژکتور در مرکز دهانه‌ی استوانه قرار دارد و قطر سوراخ آن ۰/۲۱۳ میلی‌متر، فشار سوزن انژکتور ۲۲۰ bar



شکل ۱. نمای هندسی نیمی از محفظه‌ی احتراق.

جدول ۱. مقادیر $S_{d\phi}$ و $\Gamma\phi$ برای کمیت‌های مختلف ϕ (با توجه به معادله (۱)).

نوع معادله	ϕ	Γ	S_{ϕ}	$S_{\phi d}$
پیوستگی	ν	\cdot	\cdot	$S_{md} = \frac{-\pi}{\varphi_d V_p} \frac{\rho_d}{\Delta t} \sum_k N_{d,k} \{ (D_{d,k}^{n+1})^{\tau} - (D_{d,k}^n)^{\tau} \}$
نکانه در جهت محوری	u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{\gamma}{\varphi} \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \nabla \cdot u + \rho k)$	$S_{md} = \frac{-\pi}{\varphi_d V_p} \frac{\rho_d}{\Delta t} \sum_k N_{d,k} \{ (D_{d,k}^{n+1})^{\tau} u_{d,k}^{n+1} - (D_{d,k}^n)^{\tau} u_{d,k}^n \}$
نکانه در جهت شعاعی	v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{\gamma}{\varphi} \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \nabla \cdot u + \rho k) - \gamma \mu_{eff} \frac{v}{r}$	$S_{vd} = \frac{-\pi}{\varphi_d V_p} \frac{\rho_d}{\Delta t} \sum_k N_{d,k} \{ (D_{d,k}^{n+1})^{\tau} v_{d,k}^{n+1} - (D_{d,k}^n)^{\tau} v_{d,k}^n \}$
معادله تلاطم k	k	μ_{eff}/σ_k	$G - \rho \epsilon$	\cdot
معادله تلاطم ϵ	ϵ	$\mu_{eff}/\sigma_{\epsilon}$	$\frac{k}{\epsilon} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon)$	\cdot
معادله انرژی (انتالی h)	h	μ_{eff}/σ_h	\cdot	$S_{hd} = \frac{-\pi}{\varphi_d V_p} \frac{\rho_d}{\Delta t} \sum_k N_{d,k} \left\{ (D_{d,k}^{n+1})^{\tau} (C_p T)_{d,k}^{n+1} - (D_{d,k}^n)^{\tau} (C_p T)_{d,k}^n \right\}$
معادله جزء جرمی بخار سوخت	f_{fuel}	μ_{eff}/σ_f	\cdot	$S_{fd} = S_{md} = \frac{-\pi}{\varphi_d V_p} \frac{\rho_d}{\Delta t} \sum_k N_{d,k} \{ (D_{d,k}^{n+1})^{\tau} - (D_{d,k}^n)^{\tau} \}$
<p>در این روابط G, μ_{eff}, μ_t به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:</p> $\mu_t = c_{\mu} \rho k^{\gamma} / \epsilon$ $\mu_{eff} = \mu_{mol} + \mu_t$ $G = \mu_t \left[\gamma \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{\tau} + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^{\tau} + \left(\frac{v}{r} \right)^{\tau} \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^{\tau} \right] - \frac{\gamma}{\varphi} (\mu \nabla \cdot u + \rho k) (\nabla \cdot u)$				

$$\frac{du_d}{dt} = k_d (u + u' - u_d) - \frac{1}{\rho_d} \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{dv_d}{dt} = k_d (v + v' - v_d) - \frac{1}{\rho_d} \frac{dp}{dr} \quad (5)$$

در روابط فوق u, v به ترتیب سرعت گاز در جهات محوری و شعاعی بوده و افت و u', v' خیز این سرعت‌ها هستند. k_d تأثیر نیروی برشی بر قطرات است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_d = \frac{\gamma}{\varphi} C_D \frac{\rho}{\rho_d} \frac{1}{D_d} \left| \bar{V}_{rel} \right| \quad (6)$$

که در آن \bar{V}_{rel} سرعت نسبی میان فازهای گاز و مایع است:

تلاطم و کسر جرمی بخار سوخت) در جدول ۱ آمده است. مقادیر $S_{d\phi}$ که جمله چشمه فاز مایع است و متغیر عمومی ϕ که نوع معادله را تعیین می‌کند، نیز در جدول ۱ آمده است.

معادلات فاز مایع

معادلات حاکم بر حرکت قطرات (مسیر و تکانه) در راستای محوری و شعاعی به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{dx_d}{dt} = u_d \quad (2)$$

$$\frac{dr_d}{dt} = v_d \quad (3)$$

در داخل سلول پاشش معادلات بقاء جرم و تکانه اعمال می‌شود، به طوری که با اعمال آن سرعت اولیه‌ی محوری قطره و سرعت پاشش سوخت از نازل به دست می‌آید.

در خصوص شرایط اولیه فرض می‌شود که تمامی جرم مایع در لحظه‌ی اولیه به بسته‌هایی از قطرات تبدیل می‌شود. در این لحظه، موقعیت، سرعت و تعداد قطرات داخل هر بسته با بسته‌های دیگر متفاوت است. دما و فشار فضای داخل محفظه قبل از تزریق اسپری مشخص است و خواص ترمودینامیکی گاز به کمک معادله‌ی حالت تعریف می‌شود. از آنجا که در لحظه‌ی اولیه، در داخل محفظه مایع وجود ندارد، تمامی مشخصات مربوط به فاز مایع و مقدار جزء جرمی بخار سوخت در این لحظه را می‌توان نادیده گرفت.

فرض می‌شود که هر قطره معرف یک بسته از قطرات ریزتر کروی شکل است که با یکدیگر اثر متقابل ندارند. با پاشش تعداد کافی از این بسته‌ها با خواص متفاوت، می‌توان خواص کلی اسپری تزریق شده را تحلیل کرد. باید توجه داشت که اثر دو فاز بر یکدیگر توسط جمله‌های چشمه و چاه که در معادلات فاز گاز ظاهر می‌شوند، لحاظ می‌شود.

معادلات تلاطم k-ε غیرخطی

در مدل‌سازی حرکت جریان در محفظه احتراق، شدت تلاطم متأثر از حرکت قطره و سرعت آن است، همچنین افزایش یا کاهش درصد جرمی بخار سوخت به افزایش یا کاهش شدت تلاطم بستگی دارد. بنابراین مدل تلاطمی که دارای آهنگ چرخش و کرنش دقیق‌تری باشد و جمله‌های انرژی جنبشی (شدت تلاطم) و آهنگ استهلاک در تنش رینولدز را با دقت بالاتری بیان کند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. ضرائب مدل توابعی از آهنگ چرخش و کرنش هستند. مدل k-ε غیرخطی نیز تابعی از آهنگ چرخش (تناوایی) و کرنش است، در نتیجه اعمال این ضرائب به مدل غیرخطی شدت چرخش را بالاتر برده و تأثیر آهنگ چرخش بر خطوط جریان را بهتر نمایش می‌دهد. این عمل باعث بالا رفتن قدرت مدل، خصوصاً در اعمال جریان تلاطم بر روی اسپری می‌شود. در این راستا مدل k-ε غیرخطی به دلیل داشتن آهنگ چرخش، نسبت به مدل‌های مشابه خود، از مزیت بالاتری برخوردار است.

قابل ذکر است که مدل تلاطم k-ε خطی (استاندارد) از مدل غیرخطی زیر قابل استخراج است، به طوری که اگر در رابطه‌ی ۱۲ تانسور آهنگ چرخش برابر صفر قرار گیرد، تانسور تنش رینولدز مدل تلاطمی k-ε خطی به دست می‌آید. تانسور تنش در مدل تلاطم k-ε غیرخطی چنین است: [۲]

$$|\bar{V}_{rel}| = \sqrt{[(\bar{u}+u')-u_d]^2 + [(\bar{v}+v')-v_d]^2} \quad (7)$$

در محاسبات، تغییرات زمانی جرم و دما با استفاده از معادلات بورمن-جانسون^{۱۷} به صورت زیر ظاهر می‌شوند: [۸]

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d D p_1 \text{Ln}\{(P_1 - P_{v, \infty}) / (P_1 - P_{v, s})\} \frac{Sh}{RT_m} \quad (8)$$

$$\frac{d(mC_p T)_d}{dt} = \pi D_d k (T - T_d) \{Z / (e^Z - 1)\} Nu + Q \frac{dm_d}{dt} \quad (9)$$

در معادلات ۸ و ۹ کمیت Z ضریب تصحیح انتقال جرم همراه با انتقال حرارت است که چنین تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{-C_{p1} dm_d / dt}{\pi D_d k Nu} \quad (10)$$

در این رابطه k ضریب هدایت گرمایی، Nu عدد ناسلت، C_{p1} گرمای ویژه بخار سوخت در فشار ثابت، D_d قطر قطره و m_d جرم قطره هستند.

شرایط مرزی و اولیه

از آنجا که معادلات به کار رفته در این تحقیق، دستگاه معادلات جزئی غیرخطی‌اند، برای پیدا کردن یکتائی جواب به شرایط مرزی نیازمندیم. همچنین به دلیل اینکه جریان غیردائم است شرایط اولیه نیز مورد نیاز است. به طور کلی شرایط مسئله به صورت زیر بیان می‌شود:

در محور تقارن فرض می‌شود گرادیان شعاعی فاز گاز و سرعت در جهت شعاع صفر می‌باشند. این فرض باعث صفر شدن برخی از ضرائب در معادلات منفصل شده به روش حجم محدود می‌شود. اما فرض تقارن محوری برای فاز مایع به نتیجه زیر منجر می‌شود:

$$r_d^{n+1} = -r_d^{n+1} \quad (11)$$

در این رابطه اندیس d مربوط به قطره، توان n+1 مربوط به گام زمانی بعدی و r شعاع قطره است. خواص گاز در مرز ورودی، همان شرایط اولیه‌ی اعمال شده قبل از پاشش مایع است.

همچنین فرض می‌شود که نازل در محور تقارن قرار می‌گیرد و پاشش مایع در امتداد آن است. با این وجود امکاناتی برای نرم‌افزار در نظر گرفته شده که بتوان نازل را در هر کجای محفظه قرار داد و یا مایع را با هر زاویه‌ی نسبت به خط تقارن پاشید. تمامی قطرات که به صورت کروی فرض می‌شوند، بعد از عبور از «سلول پاشش»^{۱۸} با غلظت متوسط توزیع شده و اندازه‌ی آنها با توجه به تابع توزیع روزین-رامبلر^{۱۹} به صورت تصادفی مشخص می‌شود. [۴]

که در آن مقادیر Ω و S از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

$$S \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad \Omega \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (17)$$

قابل ذکر است که ثابت‌های مدل $k-\varepsilon$ استاندارد از جدول ۲ و ثابت‌های مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی از جدول ۳ به دست می‌آیند. با توجه به معادله ۱۳، می‌توان گفت که مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی دارای دو بخش تانسورهای درجه دو Ω_{ij} و تانسورهای درجه سه S_{ijk} است. اگر تانسورهای آهنگ چرخش Ω (یا آهنگ کرنش S) دوبار در هم ضرب شوند، مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی از درجه دو است، و اگر سه بار در هم ضرب شوند مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی از درجه سه است.^[۱۲]

اهمیت تحلیلی مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی

در حالت تحلیلی می‌توان گفت خطوط جریان $(x$ و $y)$ به صورت زیر وابسته به سرعت‌های U_i و U_j هستند:

$$x = \int U_i dt \quad \text{و} \quad y = \int U_j dt \quad (18)$$

سرعت‌ها طبق رابطه ۱۳ وابسته به تانسور آهنگ چرخش هستند. بنابراین تغییرات تانسور آهنگ چرخش، سرعت‌ها را تغییر می‌دهد و تغییر سرعت نیز خطوط جریان $(x$ و $y)$ را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد از آنجاکه در مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی آهنگ چرخش (Ω_{ij}) به‌طور کامل لحاظ شده است. بنابراین تغییرات سرعت در مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی شدیدتر است. این عمل باعث می‌شود تا خطوط جریان و گردایان سرعت در اطراف اسپری و گوشه‌های محفظه‌ی احتراق بهتر نمایان شود.

شرایط مرزی و اولیه در مدل غیرخطی

به دلیل صاف بودن دیواره و عدم لغزش شاره روی آن، جریان نزدیک دیواره متأثر از وجود آن بوده و عدد رینولدز کوچک می‌شود. یک روش مفید برای لحاظ کردن اثر دیواره این است که در نزدیک دیواره جریان را آرام و یک‌بعدی، و تنش برشی را ثابت و برابر تنش برشی روی دیواره، فرض کنند.

در شرایط مرزی داده شده لایه‌ها به دو قسمت: لایه‌ی چسبند، و لایه‌ی لختی تقسیم می‌شود و قوانین فون کارمن^[۲۲] برای فاصله‌ها و سرعت‌های بدون بعد قابل اعمال است. در لایه‌ی لختی مقدار انرژی تلاطم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$k = \sqrt{C_\mu} \tau_w / \rho \quad (19)$$

ضریب C_μ از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه می‌شود و با ضریب مدل $k-\varepsilon$ استاندارد متفاوت است. در مدل $k-\varepsilon$ غیرخطی C_μ تابعی از آهنگ کرنش و چرخش است، بنابراین مدل‌سازی اسپری در نقاطی که

$$\begin{aligned} \overline{u_i' u_j'} = & -\nu_t S_{ij} + \frac{\nu_t}{\rho} k \delta_{ij} + c_{\nu 1} \frac{k}{\varepsilon} (S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} \delta_{ij}) + \\ & c_{\nu 2} \frac{k}{\varepsilon} (\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}) + c_{\nu 3} \nu_t \frac{k}{\varepsilon} (\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \delta_{ij}) \\ & + c_{\nu 4} \frac{k}{\varepsilon} (S_{ki} \Omega_{ij} + S_{kj} \Omega_{ji}) S_{kl} + c_{\nu 5} \frac{k}{\varepsilon} (\Omega_{il} \Omega_{lm} S_{mj} + \\ & S_{il} \Omega_{lm} \Omega_{mj} - \frac{\nu_t}{\rho} S_{lm} \Omega_{mn} \Omega_{nl} \delta_{ij}) + c_{\nu 6} \nu_t \frac{k}{\varepsilon} S_{ij} S_{kl} S_{kl} + \\ & c_{\nu 7} \frac{k}{\varepsilon} S_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه‌ی فوق Ω_{ij} و S_{ij} به ترتیب تانسورهای آهنگ چرخش (تاوایی) و آهنگ کرنش هستند که به صورت معادلات ۱۳ و ۱۴ بیان می‌شوند:

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{\nu_t} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

$$S_{ij} \equiv \frac{1}{\nu_t} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

ν_t نیز لزجت گردابه‌ی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

در رابطه‌ی ۱۵، c_μ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_\mu = \min \left(\frac{1}{0.9S^{1/4} + 0.4\Omega^{1/4} + 3/5}, 0.15 \right) \quad (16)$$

جدول ۲. ضرائب ثابت در مدل تلاطم $k-\varepsilon$ استاندارد.

مقدار عددی	ضریب ثابت
۰/۰۹	C_μ
۱/۴۴	C_1
۱/۹۲	C_2
-۰/۳۷۳	C_3
۱/۰	σ_k
۱/۲۲	σ_ε

جدول ۳. ثابت‌های به کار رفته در مدل تلاطم $k-\varepsilon$ غیرخطی.

-۰/۲	C_1
۰/۴	C_2
$2 - \exp(-(S-\Omega)^2)$	C_3
$-32C_\mu^2$	C_4
۰	C_5
$-16C_\mu^2$	C_6
$-16C_\mu^2$	C_7

$$A_p^{n+1} u_p^{n+1} = \sum_c A_c^{n+1} u_c^{n+1} + S - \frac{\pi}{6} \frac{1}{\delta t} \sum_k N_{d,k} \{ \rho_{d,k}^{n+1} (D_{d,k}^r)^{n+1} u_{d,k}^{n+1} - \rho_{d,k}^n (D_{d,k}^r)^n u_{d,k}^n \} \quad (26)$$

که در آن u_p سرعت فاز گاز در مرکز «المان حجم»، u_c مؤلفه‌های محوری سرعت گاز در چهار نقطه‌ی مجاور، A_c ضرائب حاصل از اثرات جابه‌جائی^{۲۵} و نفوذ^{۲۶} و S شامل گردایان فشار و مقدار اندازه حرکت هستند. با جایگذاری معادله‌ی ۲۵ در معادله‌ی ۲۶، شکل نهائی و کاربردی معادله‌ی ۲۶ به صورت معادله‌ی ۲۷ به دست می‌آید:

$$[A_p^{n+1} + \frac{\pi}{6} \frac{1}{\delta t} \sum_k N_{d,k} (\frac{\rho_{d,k}^{n+1} (D_{d,k}^r)^{n+1}}{1 + \delta t \cdot k_d^{n+1}})] u_p^{n+1} = \sum_c A_c^{n+1} u_c^{n+1} + S + \frac{\pi}{6} \frac{1}{\delta t} \sum_k N_{d,k} \{ \rho_{d,k}^n (D_{d,k}^r)^n u_{d,k}^n - \rho_{d,k}^{n+1} (D_{d,k}^r)^{n+1} (\frac{u_{d,k}^n + \delta t \cdot k_d^{n+1} u_p^{n+1}}{1 + \delta t \cdot k_d^{n+1}}) \} \quad (27)$$

در این تحقیق، معادلات اختلاف محدود به دست آمده، با استفاده از الگوریتم تعمیم یافته‌ی PISO حل می‌شوند.^[۱۱، ۱۰، ۴] در مجموع می‌توان گفت: معادلات با روش عددی حجم‌های محدود، منفصل شده است. جت مایع با تقارن محوری درون محفظه پاشیده شده و با هوا مخلوط می‌شود. (شکل ۱) در مکانی که حضور اسپری بیشتر است شبکه‌ی محاسباتی ریزتر است تا محاسبات بر روی قطرات دقیق‌تر انجام شود. همچنین برای بالا بردن دقت محاسبات، علاوه بر کوچک فرض کردن شبکه‌ی محاسباتی، معادلات مربوط به هر قطره جداگانه در نظر گرفته شده و محاسبات بر روی تک تک قطرات انجام می‌شود (شکل ۲).

نتایج و بحث

نتایج ارائه شده در این نوشتار با اعمال شرایط زیر به دست آمده است:

تعداد قطرات اضافه شده در هر گام زمانی ۲ عدد، قطر متوسط قطرات^{۲۷} ۲۵ میکرومتر و قطر دهانه‌ی انژکتور ۰/۲۱۳ میلی‌متر است. دمای اولیه‌ی محفظه ۵۷۳ کلوین و فشار اولیه‌ی محفظه ۴۵ bar است. محفظه استوانه‌یی شکل و با قطر ۷/۵ و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر است و انژکتور در مرکز دهانه‌ی استوانه قرار دارد. فشار سوزن انژکتور ۲۲۰ bar و نسبت طول به قطر آن ۳/۶ است. سرعت اولیه‌ی حرکت قطرات با توجه به منحنی توزیع شار دبی حجمی در محدوده‌ی ۲۲۰-۱۲۰ m/s در نظر گرفته شده و طول زمان پاشش ۱/۴ میلی ثانیه است. با توجه به این که شبکه‌ی محاسباتی در نتایج برنامه‌ی

آهنگ چرخش بالا باشد (گوشه‌های محفظه و نقاط ورودی جریان) بهتر انجام می‌شود. این مطلب در نتایج به خوبی قابل نمایش است. برای اعمال شرایط اولیه، با توجه به شرایط خاص این مسئله (پاشش در محیط ساکن)، مقدار انرژی جنبشی تلاطم اولیه (k) ناچیز در نظر گرفته می‌شود و آهنگ اتلاف (ϵ) به گونه‌ی تنظیم می‌شود که مقدار لزجت تلاطمی، قابل مقایسه (هم مرتبه) با لزجت آرام شود.

مدل عددی

معادلات میر و تکانه برای فاز مایع با استفاده از روش اختلاف محدود به شکل زیر منفصل شده و در محاسبات اسپری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$x_d^{n+1} = x_d^n + u_d^n \delta t \quad (20)$$

$$r_d^{n+1} = r_d^n + v_d^n \delta t \quad (21)$$

$$u_d^{n+1} = u_d^n + k_d^{n+1} \delta t [(u_g + u'_g)^{n+1} - u_d^{n+1}] \quad (22)$$

$$v_d^{n+1} = v_d^n + k_d^{n+1} \delta t [(v_g + v'_g)^{n+1} - v_d^{n+1}] \quad (23)$$

در روابط ۲۲ و ۲۳ مقدار k_d^{n+1} چنین تعریف می‌شود:^[۱]

$$k_d^{n+1} = \frac{3}{4} c_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} \{ [(u_g + u'_g - u_d)^2 + (v_g + v'_g - v_d)^2] \}^{1/2} \quad (24)$$

در این رابطه u_d و u_g به ترتیب سرعت قطره و سرعت گاز در جهت محوری هستند. همچنین C_D ضریب نیروی پسا^{۲۳} و D_d قطر قطره تعریف می‌شوند.

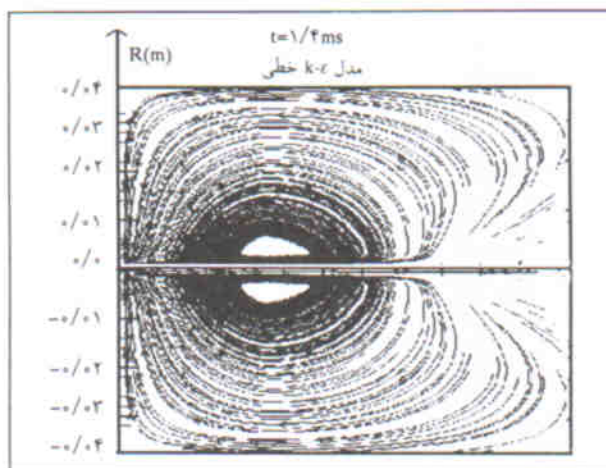
برای استفاده از روابط ۲۲ و ۲۳ در کد رایانه‌یی، لازم است این روابط در معادلات فاز گاز مرتب شوند. مثلاً صورت مرتب شده‌ی معادله‌ی ۲۲ به شکل زیر است:

$$u_{d,k}^{n+1} = \frac{u_{d,k}^n + \delta t k_d^{n+1} (u_p^{n+1} + u_p^{n+1})}{1 + \delta t k_d^{n+1}} \quad (25)$$

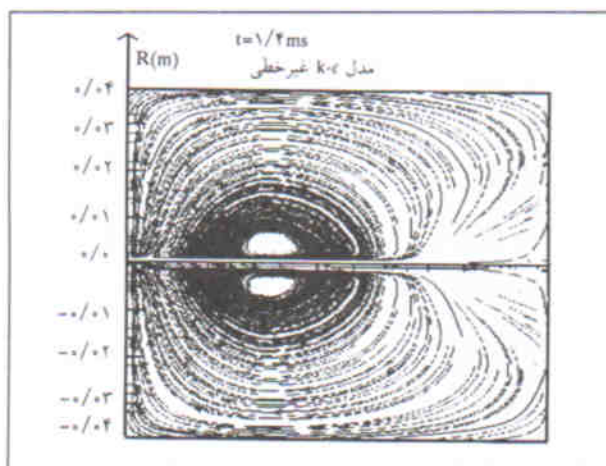
برای انفصال معادلات حاکم بر فاز گاز، از روش حجم محدود استفاده می‌شود. در این روش، میدان حل از طریق شبکه‌ی محاسباتی به تعداد مناسبی از حجم‌های کوچک تقسیم می‌شود و معادلات جبری از انتگرال‌گیری معادلات دیفرانسیل بقاء، بر روی هر یک از المان‌های حجم به دست می‌آید. لازم به ذکر است، برای تقریب کردن معادلات فاز گاز از روش ضمنی اویلر و روش ترکیبی^{۲۴} (مرکزی - بالادست) استفاده شده است. این عمل علاوه بر افزایش پایداری در حل عددی، امکان در نظر گرفتن فاصله‌های زمانی نسبتاً بزرگ را ممکن می‌سازد. مثلاً مؤلفه‌ی محوری معادله‌ی تکانه به شکل ساده شده، به صورت زیر است:

مدل غیرخطی افزایش می‌یابد. بالا رفتن میزان نفوذ فاز گاز باعث افزایش شدت تبخیر و مانع از پخش شدن قطرات در جهت شعاعی می‌شود.

شکل‌های ۴ الف و ۴ ب تأثیر قطرات سوخت بر خطوط جریان در مدل خطی و غیرخطی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۴ ب می‌توان گفت که در مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی، به دلیل در نظر گرفتن آهنگ چرخش و گرادیان سرعت در تمامی مقاطع محفظه، خطوط جریان دارای نظم بهتری است. خصوصاً در اطراف تقاطعی که تراکم اسپری بیشتر است و بسته‌های قطرات بهتر قابل نمایش هستند. این خطوط منظم‌ترند. علاوه بر آن با مشاهده‌ی شکل ۴ ب می‌توان گفت که خطوط جریان در گوشه‌های محفظه نیز نفوذ بهتری دارند. این عمل به خاطر لحاظ نمودن تانسور آهنگ چرخش و تأثیر افزایش تاوایی بر خطوط جریان است.



الف) مدل تلاطم $k-\epsilon$ خطی



ب) مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی

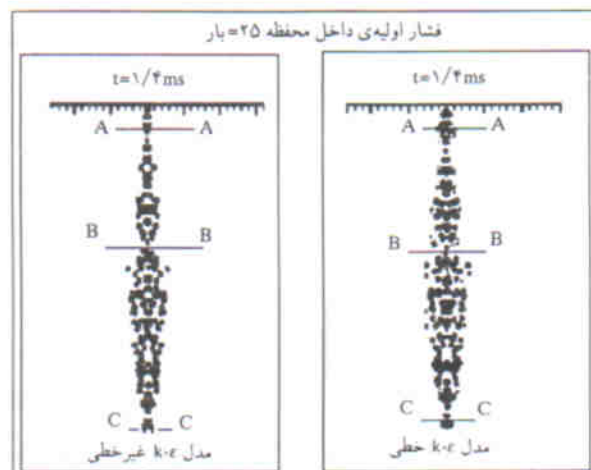
شکل ۴. تأثیر حرکت اسپری بر خطوط جریان.

رایانه‌یی تأثیر زیادی داشته و دقت محاسبات به شبکه وابسته است. به منظور مشخص شدن شبکه‌ی محاسباتی و حصول اطمینان از عدم وابستگی نتایج به آن، محاسبات برای چند شبکه‌ی مختلف انجام شد. و بعد از بررسی نتایج، شبکه‌ی $3 \times 3 \times 3$ در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که در تقاطعی که حضور اسپری بیشتر است، شبکه ریزتر انتخاب شده تا محاسبات دقیق‌تر باشد. برای انتخاب گام زمانی مناسب، سه گام زمانی مناسب متوالی $\Delta t = 2/8 \times 10^{-6} s$ ، $\Delta t = 1/4 \times 10^{-6} s$ و $\Delta t = 0/7 \times 10^{-6} s$ بررسی شد. بعد از بررسی‌های لازم مشخص شد که با کوچک شدن گام زمانی، جواب‌های به دست آمده به هم نزدیک‌تر می‌شوند. بنابراین، در انجام محاسبات نهائی کوچک‌ترین گام زمانی ($\Delta t = 0/7 \times 10^{-6} s$) مورد استفاده قرار گرفته است.

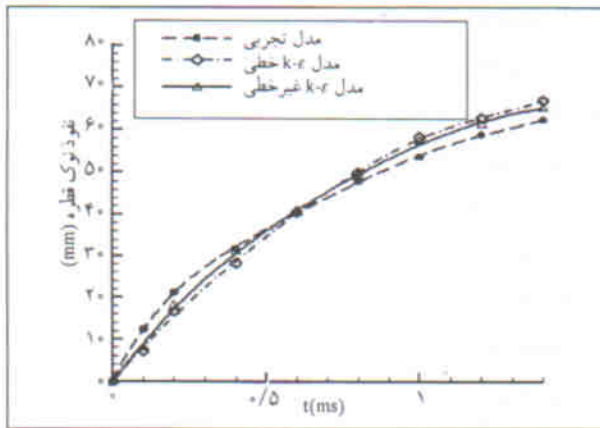
در اینجا از مدل‌های $k-\epsilon$ غیرخطی درجه دو و درجه سه به طور همزمان استفاده شده و نتایج حاصل از آنها با مدل تلاطمی $k-\epsilon$ استاندارد و نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

ساختار اسپری در جهت شعاعی و محوری در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. این شکل نشان‌گر تأثیر مدل‌های تلاطم خطی و غیرخطی بر رفتار قطرات است. برای مقایسه‌ی دقیق‌تر بین دو مدل خطی و غیرخطی، سه مقطع مختلف در این دو شکل دیده می‌شود. در هر سه مقطع شکل اسپری در مدل $k-\epsilon$ غیرخطی در جهت شعاعی منظم‌تر و باریک‌تر (کم عرض‌تر) است و در مدل خطی قطرات جدا شده از بدنه‌ی اصلی اسپری، بیش از مدل غیرخطی است و اسپری عریض‌تر است. علت این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد:

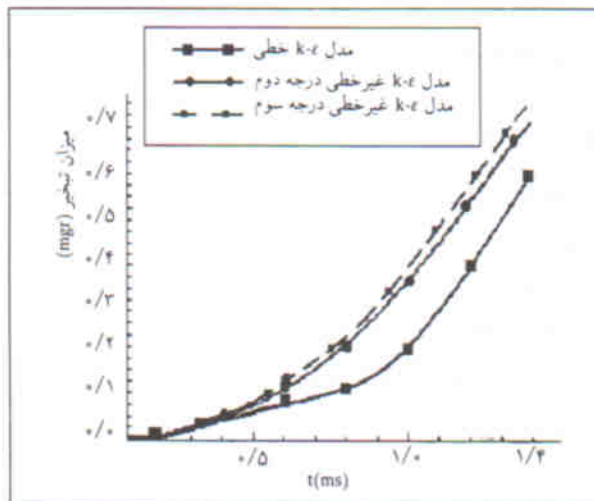
با توجه به اینکه در مدل $k-\epsilon$ غیرخطی علاوه بر تانسور کرنش، تانسور آهنگ چرخش نیز اعمال می‌شود و این پارامتر باعث بالا رفتن تاوایی می‌شود. بنابراین فرایند میزان نفوذ فاز گاز بر فاز مایع در



شکل ۳. نمایش ساختار اسپری در جهت شعاعی و محوری و تأثیر مدل‌های تلاطم بر روی قطرات بعد از $1/3$ میلی ثانیه پاشش.



شکل ۶. مقایسه بین میزان نفوذ قطرات در مدل های k-ε خطی، غیرخطی و نتایج تجربی.^[۲]



شکل ۷. مقایسه ی بین جرم کلی تبخیر قطرات در مدل های k-ε خطی، غیرخطی درجه دو و درجه سه.

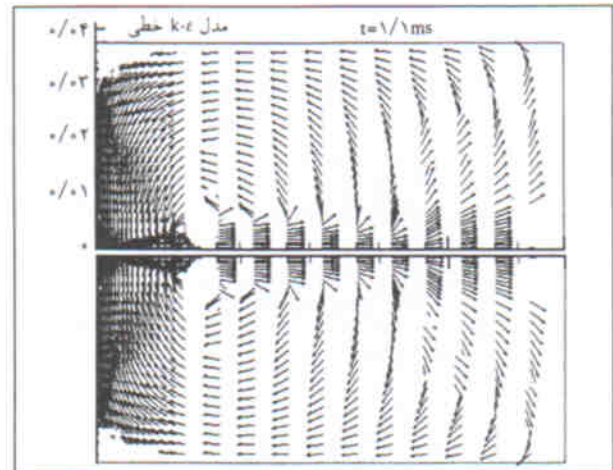
حاصل از مدل k-ε غیرخطی به داده های تجربی نزدیک تر است و بهتر از مدل k-ε استاندارد، نتایج تجربی را تأیید می کند.

تغییرات جرم کلی تبخیر نسبت به زمان پاشش با توجه به مدل های مختلف تلاطم در شکل ۷ ملاحظه می شود. در اینجا نیز مشاهده می شود که مدل درجه سه دارای نرخ تبخیر بالاتری است، چراکه این مدل به دلیل دارا بودن تانسور مرتبه سه^{۲۸}، نسبت به مدل غیرخطی درجه دو دارای دقت بیشتری است و همچنین آهنگ چرخش بالاتری دارد. بنابراین میزان تبخیر در مدل غیرخطی درجه سه بیشتر از درجه دو است و همچنین میزان تبخیر درجه دو بیشتر از مدل تلاطم استاندارد است.

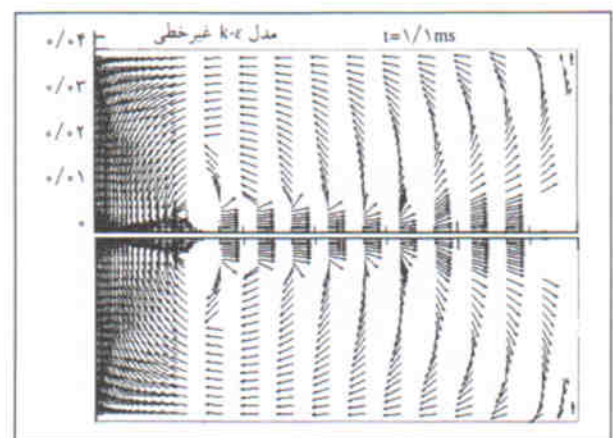
تأثیر مدل k-ε غیرخطی بر نمایه ی سرعت داخل لایه ی مرزی در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ دیده می شود. از نمودارهای به دست آمده می توان نتیجه گرفت که برگشت جریان در مدل غیرخطی دقیق تر

در شکل های ۵ الف و ۵ ب میدان برداری سرعت نشان داده شده است تا اثر قطرات بر میدان سرعت مورد بررسی قرار گیرد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، زمانی که بردار سرعت تغییر جهت می دهد، اختلاف بین مدل تلاطم k-ε خطی و غیرخطی بهتر نمایان می شود. با توجه به این مطلب می توان نتیجه گرفت که در مدل خطی تغییر جهت در بردار سرعت نامنظم و ناگهانی است اما در مدل غیرخطی منظم و تدریجی است. همچنین بردار سرعت در گوشه های میدان حل با استفاده از مدل غیرخطی دقیق تر محاسبه شده است. نظم و دقت حاصله، به دلیل اعمال تانسور آهنگ چرخش در مدل غیرخطی است.

مقایسه ی بین میزان نفوذ اسپری به دست آمده از مدل های تلاطم k-ε خطی و غیرخطی با نتایج تجربی برای فشار محفظه ی ۲۵ bar در شکل ۶ دیده می شود. به طوری که در شکل مشاهده می شود، نتایج

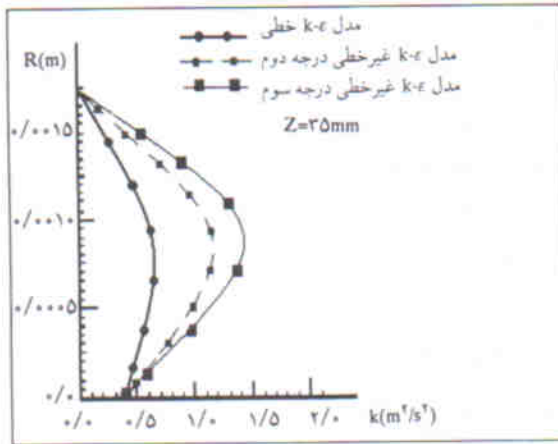


الف) مدل تلاطم k-ε خطی؛

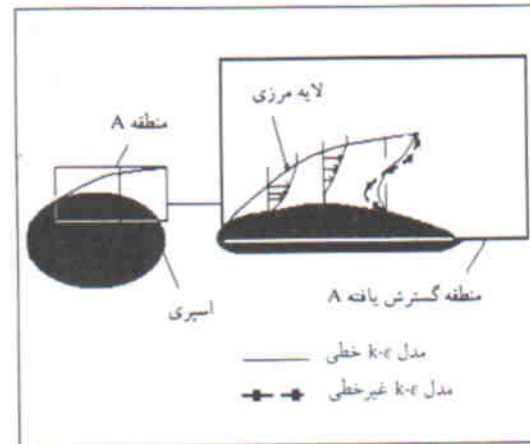


ب) مدل تلاطم k-ε غیرخطی؛

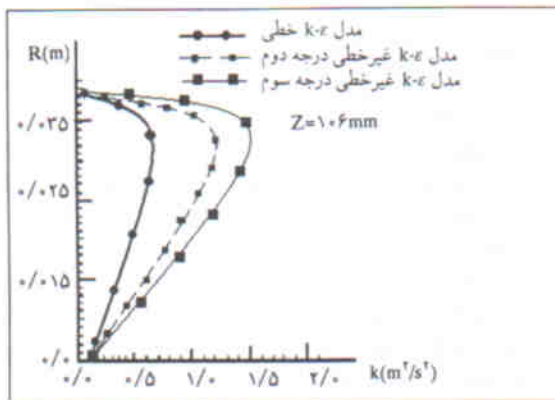
شکل ۵. تأثیر حرکت اسپری بر بردار سرعت.



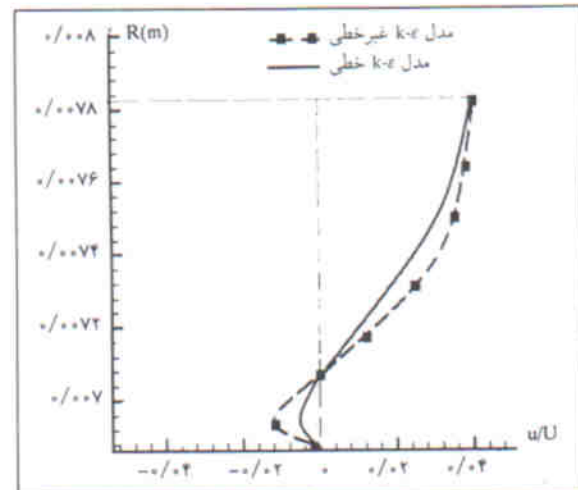
شکل ۱۱. مقایسه سه مدل مختلف تلاطم در مجاورت قطرات.



شکل ۸. نمایش کلی هندسه لایه مرزی، جهت مقایسه بین مدل‌های تلاطم $k-\epsilon$ خطی و غیرخطی در مجاورت قطرات. [۱۲]



شکل ۱۲. مقایسه سه مدل مختلف تلاطم در مجاورت جداره.



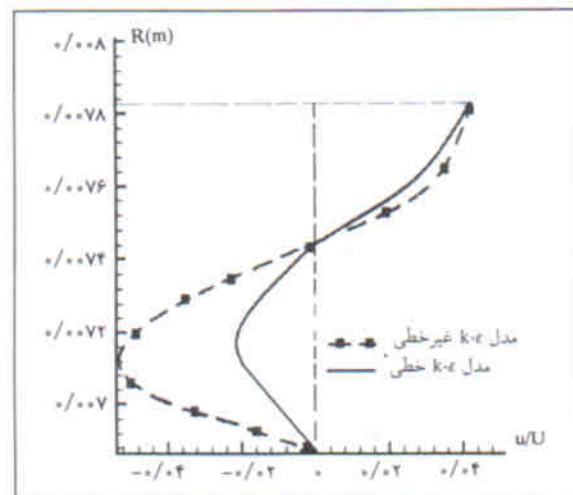
شکل ۹. نمایه سرعت داخل لایه مرزی در مجاورت قطرات (ابتدای برگشت جریان).

است و نمایه سرعت منظم تری دارد. این اشکال در مجاورت اسپری (لایه مرزی اطراف اسپری) ترسیم شده تا اختلاف بین مدل $k-\epsilon$ خطی و غیرخطی دقیقاً نمایان شود.

تأثیر مدل $k-\epsilon$ غیرخطی درجه دو، درجه سه و مدل $k-\epsilon$ استاندارد بر انرژی جنبشی تلاطم در مقطع میانی اسپری ($x=25\text{mm}$) و در مجاورت جداره ($X=106\text{mm}$) در اشکال ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. از نمودار حاصله می‌توان نتیجه گرفت که انرژی جنبشی تلاطم در مدل $k-\epsilon$ غیرخطی درجه سه، نسبت به دو مدل دیگر نمود بهتری دارد، خصوصاً هنگامی که جریان تغییر جهت می‌دهد، این نمود آشکارتر می‌شود. این نتیجه را می‌توان با مشاهده‌ی منحنی انرژی جنبشی تلاطم در منطقه‌ی میانی و در مجاورت جداره به راحتی ملاحظه کرد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد که در مدل $k-\epsilon$ غیرخطی



شکل ۱۰. نمایه سرعت داخل لایه مرزی در مجاورت قطرات (انتهای برگشت جریان).

۳. نمایه‌ی سرعت و به تبع آن خطوط جریان با اعمال مدل تلاطم $k-\epsilon$ غیرخطی در اطراف اسپری و در گوشه‌های میدان حل، منظم‌تر و دقیق‌تر محاسبه می‌شوند.
۴. میزان نفوذ اسپری با اعمال مدل $k-\epsilon$ غیرخطی به داده‌های تجربی موجود نزدیک‌تر است.
۵. میزان تبخیر اسپری با اعمال مدل‌های مختلف تلاطم، شامل $k-\epsilon$ غیرخطی درجه سه، غیرخطی درجه دو و مدل استاندارد، به ترتیب کاهش می‌یابد.
۶. انرژی جنبشی تلاطم در مدل $k-\epsilon$ غیرخطی درجه سه و درجه دو نسبت به مدل تلاطم $k-\epsilon$ استاندارد دارای نمود بهتری است.

- آهنگ چرخش بالاست، که بالا بودن آهنگ چرخش منجر به نتایج زیر می‌شود:
۱. قطرات جدا شده از اسپری، در مدل $k-\epsilon$ غیرخطی کمتر است و اسپری نظم بهتری دارد. این عمل به دلیل در نظر گرفتن آهنگ چرخش در مدل غیرخطی است که باعث افزایش گردابه‌ها می‌شود، به طوری که تراکم گردابه‌ها اجازه‌ی پراکنده شدن قطرات در جهت شعاعی را نمی‌دهند.
 ۲. دمای بالای محفظه از یک سو، و بالا بودن شدت تلاطم و افزایش مقدار گردابه‌ها از سوی دیگر باعث می‌شوند که قطرات جدا شده از بدنه‌ی اصلی اسپری سریع‌تر تبخیر شوند.

پانویس

1. Suga
 2. Penetration
 3. Turbulence Intensity
 4. Speziale
 5. Watkins
 6. Gas-Droplet Flow
 7. Gosman
 8. Berg
 9. Random
 10. Gonzalez
 11. Isotropic
 12. Gaussian
 13. Eddy life time
 14. characteristic eddy size
 15. Gas Phase
 16. Droplet Phase
 17. Borman & Jonson
 18. Injection Cell (این سلول محاسباتی است.)
 19. Rosin-Rammeler
 20. quadratic stress-strain
 21. cubic stress-strain
 22. Von Karman
 23. Drag
 24. Hybrid
 25. Convection
 26. Diffusion
 27. Suater Mean Diameter
 ۲۸. با توجه به رابطه ۱۲، اگر جملات اول تا هشتم در مدل غیرخطی اعمال شوند تانسور مرتبه دو (مدل غیرخطی مرتبه دو) و اگر جملات نهم الی سیزدهم اعمال شوند، تانسور مرتبه سه تعریف می‌شود، که این تانسور دارای دقت بیشتری است.
- منابع
1. Speziale, C.G. "On non-linear $k-1$ and $k-\epsilon$ models of turbulence", *J. Fluid mech.* **178**, pp 459-475 (1987).
 2. Suga, K. "Development and application of a cubic eddy - viscosity model of turbulence", *Int. J. Heat and Fluid Flow* **17** (2), pp 108 (1996).
 3. Behzadi, S.A. and Watkins, A.P. "Flow and turbulence modeling in a motored reciprocating engine using a cubic non-linear $k-\epsilon$ turbulence model", Elsevier Science Ltd. (1999).
 4. Watkins, A.P. and Khaleghi, H. "Modeling diesel spray evaporation using a non-iterative implicit solution scheme", *J. Appl. Math. modelling*, **14** (1990).
 5. Gosman A.D. and Watkins, A.P. "The ePISO computer codes for prediction of laminar and turbulent flow-diesel engine combustion", *Imp. Coll. Mech. Eng.* (1973).
 6. Gosman, A.D., Johns, J.R. and Watkins, A.P. "Development of prediction methods for in-cylinder processes reciprocating engines", Plenum Press. (1980).
 7. Berg, V. Alajbegovic, E. "Multiphase modeling of diesel sprays with the eulerian/eulerian approach", 17th ILASS Europe Conference, Zurich (2001).
 8. Gonzalez, A.C. and Gosman, A.D. "Application of non-linear $k-\epsilon$ models to in-cylinder flows", *J. Phys. Fluids A*, **2** (8), (1998).
 9. Borman, G.L. and Jonhson, J.H. "Unsteady vaporization histories and trajectories of fuel drops injected into swirling air", SAE 598C National Power Plant Meeting Philadelphia (1962).
 10. Khaleghi, H. and Fallah, E. "Comparison of ASM and K-epsilon models in the calculation of flows in reciprocating engine", Proceeding of the Ninth Asian Congress of Fluid mechanics, Isfahan, Iran, (May 2002).
 11. Khaleghi, H. and Hosseini, S.M. "Numerical modeling of spray combustion in DI diesel", *Proceeding of the 11th Annual Conference of the CFD Society of Canada* (2003).
 12. Khaleghi, H. Ganji, D.D. "The effect of nonlinear $k-\epsilon$ model on the spray", *8th Fluid Dynamics Conference*, Tabriz, Iran (September 2003).