

# مدل سازی اسپری مایع و مطالعات پارامتریک آن در جریان دوفازی محفظه احتراق

داود دومیری گنجی و حسن خالقی\*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی، بخش مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی،

صندوق پستی ۴۸۳۸- ۱۴۱۵۵

**چکیده:** میزان نفوذ و تبخیر اسپری در محفظه احتراق در بازدهی موتور نقش اساسی دارد. برای بررسی میزان نفوذ و افزایش تبخیر اسپری در جریان دوفازی مطالعات پارامتریک انجام شده است تا عوامل مؤثر بر این پدیده مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، مهم ترین پارامترهای تاثیرگذار در میزان نفوذ و تبخیر اسپری مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام این کار، تاثیر پارامترهای فیزیکی فاز مایع بر فاز گاز شامل: تاثیر قطر متوسط قطره ها (SMD) بر جرم کلی تبخیر و نفوذ اسپری در اتاق احتراق، تاثیر قطره های سوخت بر میدان جریان سیال داخل محفظه، تعداد قطره های سوخت اضافه شده در هر گام زمانی بر میزان تبخیر و تاثیر وجود قطره های سوخت بر شدت توربولانس و نرخ اضمحلال آن بررسی شده است. هم چنین برهم کنش فاز گاز بر فاز مایع شامل: اثر فشار و دمای اولیه محفظه بر میزان نفوذ اسپری و ساختار آن و تاثیر شدت توربولانس و نرخ اضمحلال آن بر رفتار اسپری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله برای مدل سازی جریان اسپری از مدل قطره های مجزا (DDM) برای بررسی شکست قطره ها از مدل ریتس - دیواکر، برای مدل سازی جریان توربولانس از مدل  $k - \epsilon$  استاندارد و برای حل معادله های حاکم از روش حجمهای محدود به همراه الگوریتم PISO استفاده شده است. نتیجه های به دست آمده از این تحقیق با نتیجه های آزمایشگاهی و با برخی از نتیجه های حاصل از کد کامپیوتری KIVA مقایسه شده است. با توجه به نتیجه های حاصل می توان گفت در شرایط مشابه، نتیجه های این تحقیق با داده های تجربی و نتیجه های حاصل از کد KIVA (موجود) مطابقت دارد.

**واژه های کلیدی:** نفوذ و تبخیر اسپری، الگوریتم پیرو، جریان دوفازی، شکست قطره ها، توربولانس.

**KEY WORDS:** Penetration & evaporation, PISO algorithm, Two phase flow, Break up model, Turbulance.

## مقدمه

مایع برای تولید قطره های کوچک در جهت افزایش مساحت سطح سوخت تزریق شده است. این عمل باعث افزایش میزان انتقال حرارت و جرم در طی فرایند احتراق می شود.

تبخیر و نفوذ اسپری در بویلرها، موتورهای دیزل و راکت های فضایی از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و تاثیر زیادی بر بازده و قدرت موتور دارد. فرایند اصلی شامل تجزیه یا پودرشدن سوخت

\*E-mail: Khaleghi@modares.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

آن با نتیجه‌های تجربی مقایسه شد. در ضمن ساختار اسپری به‌دست آمده از این کد با نتیجه‌های تجربی و نتیجه‌های حاصل از کد کامپیوتری KIVA (موجود) مقایسه شده است.

### فرضیات اساسی

معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر بقای جرم، اندازه‌ی حرکت، انرژی و توربولانس که در دستگاه اویلری بحث می‌شوند اساس تحلیل جریان فاز گاز و انتقال حرارت آن را تشکیل می‌دهند. از سوی دیگر، معادله‌های توربولانس را به شکل متوسط در نظر گرفته و فرض می‌شود که فرایند اختلاط<sup>(۴)</sup> را بتوان با ویژگی‌های متوسط آماری توصیف نمود.

فاز مایع دارای فرمول شیمیایی  $C_{12}H_{26}$  است. محاسبه‌های فاز مایع از طریق حل معادله‌های لاگرانژی مربوط به حرکت قطره‌های مجزا (مدل قطره‌های مجزا<sup>(۵)</sup>) انجام می‌شود. این قطره‌ها از میان گاز عبور کرده جرم و اندازه‌ی حرکت خود را در داخل گاز توزیع نموده و تحت تاثیر نیروی درگ<sup>(۶)</sup> اعمال شده از سوی گاز قرار می‌گیرند. همچنین، قطره‌ها با دمای اولیه کمتر از دمای محیط، از محیط انرژی دریافت می‌کنند و تحت تاثیر توربولانس محیط نیز قرار می‌گیرند. هر قطره در واقع معرف یک بسته از قطره‌های ریزترکروی شکل است که با یکدیگر برهم‌کنش ندارند و دما، سرعت، اندازه و دیگر پارامترهای فیزیکی قطره‌های موجود در هر بسته یکسان هستند. با پاشش تعداد کافی از این بسته‌ها با ویژگی‌های متفاوت، می‌توان ویژگی‌های کل اسپری مایع تزریق شده را تحلیل کرد. باید توجه داشت که اثر دو فاز بر یکدیگر توسط عبارات چشمه/چاه<sup>(۷)</sup> و اعمال عبارت کسر حجمی<sup>(۸)</sup> در معادله‌های فاز گاز لحاظ می‌شود.

### معادله‌های حاکم بر مسأله

به‌طور کلی معادله‌های حاکم بر مسأله به معادله‌های فاز گاز و فاز مایع تقسیم می‌شوند:

### معادله‌های فاز گاز

معادله‌های حاکم بر فاز گاز شامل: معادله‌های بقای جرم،

مدل‌سازی عددی اسپری مایع همراه با آنالیز جریان آرام و مغشوش توسط گاسمن و واتکینز [۱] آغاز شد. سپس مدل‌سازی عددی اختلاط سوخت و هوا توسط گاسمن، جونز و واتکینز [۲] برای موتورهای رفت و برگشتی توسعه یافت، به‌طوری که در هردو مورد از این مدل‌سازی، اسپری به صورت فاز گاز در نظر گرفته شد. محاسبه‌های مربوط به جریان دو فازی گاز و مایع<sup>(۱)</sup> توسط گاسمن به صورت دو بعدی و توسط واتکینز و خالقی [۳ و ۴] به صورت سه بعدی انجام شد که نتیجه‌های آن منجر به کدهای کامپیوتری EPISO<sup>(۲)</sup> دوبعدی و سه بعدی در انگلستان شد. مطالعات مشابهی نیز در آمریکا انجام شد که منجر به کد کامپیوتری KIVA [۵] شد. کد EPISO بعداً توسط احمدی، عیسی و واتکینز برای حل و محاسبه‌های جریان با روش ضمنی- غیر تکراری<sup>(۳)</sup> در محفظه موتورهای پیستونی به کار رفت [۶]. همچنین این کد با همین روش توسط واتکینز و خالقی برای مدل‌سازی تبخیر اسپری به کار گرفته شد [۷]. تاکنون هردو کد پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند و نتیجه این پیشرفت‌ها تبدیل کد KIVA به KIVA-3V و کد EPISO به EPISO-II است. اما کد EPISO-II در ایران توسط خالقی و همکارانش [۸ و ۹] برای مدل‌سازی عددی نفوذ، تبخیر و شکست قطره‌ها در محیط‌های متفاوت توسعه یافت. همچنین این کد هم اکنون قادر است فرایند تبخیر و نفوذ اسپری را در محفظه‌ای با حجم ثابت و فرایند احتراق را در محفظه‌ای با حجم متغیر به صورت دوبعدی و سه بعدی مدل کند. توانمندی بیشتر این کد برای بررسی جریان سیال مغشوش همراه با مدل‌های متفاوت توربولانس (خطی یا غیرخطی) در شرایط گوناگون با الگوریتم‌های متفاوت است [۱۰-۱۳].

در این مقاله با استفاده کامل از توانمندی‌های این کد مطالعات پارامتریک نیز انجام شده، به‌طوری که رفتار قطره‌ها، همانند فرایند تبخیر، نفوذ و شکست قطره‌ها هم‌زمان تشریح شده و اثرهای متقابل آنها نسبت به هم بررسی شد. همچنین اثر دما، فشار محفظه روی قطره‌های فاز مایع و برهم‌کنش فاز مایع روی فاز گاز نیز بررسی شده است. این کد نخستین بار برای مدل‌سازی اسپری مایع با شرایط مختلف محفظه (برای ۱۲ حالت) با حجم ثابت محفظه به کار رفته و نتیجه‌های به‌دست آمده از

(۱) Gas-Droplet flow

(۲) Pressure-Implicit with Splitting of Operator

(۳) Non Iterative-Implicit

(۴) Mixing

(۵) Discrete Droplet Model (DDM)

(۶) Drag

(۷) Term Source/Sink

(۸) Void Fraction

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

تغییرهای زمانی جرم و دما از معادله‌های بورمن - جانسون<sup>(۱)</sup> [۱۵] به صورت زیر در محاسبه‌ها ظاهر می‌شوند:

$$\frac{dm_d}{dt} = -p D p_t L n \left\{ \frac{(P_t - P_{n,\infty})}{(P_t - P_{n,\infty})} \right\} \frac{Sh}{RT_m} \quad (8)$$

$$\frac{d(mC_p T)_d}{dt} = -p D p_t K (T - T_d) \left\{ \frac{Z}{(e^Z - 1)} \right\} Nu + Q \frac{dm_d}{dt} \quad (9)$$

در معادله‌های بالا کمیت  $Z$  ضریب تصحیح انتقال جرم همراه با انتقال حرارت است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

### معادله‌های حاکم بر شکست قطرها

در این تحقیق برای بررسی شکست قطرها از مدل رییس - دیواکر<sup>(۲)</sup> استفاده شده است [۱۶]. هنگامی که بسته‌های مایع تزیق می‌شوند به تدریج شروع به تغییر شکل و شکسته شدن می‌کنند، این عمل زمانی اتفاق می‌افتد که عدد وبر ( $We$ ) به اندازه کافی بزرگ باشد. مدل شکست قطرها با توجه به شکل ۱ به دو دسته ناگهانی و پیوسته تقسیم می‌شوند و مدل ناگهانی نیز به دو دسته کیفی و استریپینگ تقسیم می‌شوند [۱۶]. اما در این تحقیق از مدل شکست قطره‌های استریپینگ به دلیل گستردگی مدل و در عین حال داشتن کیفیت مطلوب، استفاده شد. قابل ذکر است که مدل کیفی<sup>(۳)</sup> که در شکل ۱ آمده است و در این کد نیز اعمال شد، ساده‌تر از مدل استریپینگ بوده و فقط وابسته به عدد وبر (یا نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی) می‌باشد، اما مدل استریپینگ هم وابسته به عدد وبر و هم وابسته به عدد رینولدز (نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوزیته) است و این دو عدد را هم‌زمان وارد معادله می‌کند. بنابراین، دارای کیفیت بهتر و دقت بالاتر می‌باشد. برای هر بسته قطره‌ها در هر گام زمانی، ضابطه‌های پایداری به‌وسیله‌ی رابطه زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد، به‌طوری که اگر معادله زیر تحقق یابد قطره‌ها در داخل بسته ناپایدار شده و شکسته می‌شوند [۱۶].

$$We / \sqrt{Re} > \frac{1}{2} \quad (11)$$

اندازه‌ی حرکت، انرژی، توربولانس و کسر جرمی بخار سوخت بوده و به صورت عمومی زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r q f) + \frac{\partial}{\partial x} (r q u f) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r r q v f) = \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_f q \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_f q \frac{\partial f}{\partial r} \right) + q S_{fd} + S_f$$

در این رابطه  $S_f$  و  $\Gamma_f$  به ترتیب ضریب نفوذ و ترم چشمه مربوط به فاز گاز هستند که مقادیرهای آنها بر اساس نوع معادله (پیوستگی، اندازه‌ی حرکت، انرژی، توربولانس و کسر جرمی بخار سوخت) در جدول ۱ آمده است. همچنین  $S_{fd}$  ترم چشمه مربوط به فاز مایع می‌باشد، که مقادیرهای آن نیز بر اساس نوع معادله در همان جدول ارائه شده است.

در این تحقیق به دلیل عملکرد خوب مدل توربولانس ( $k-\epsilon$ ) استاندارد، در اغلب جریان‌های دو بعدی و همچنین به دلیل سادگی و کاربرد فراوان آن در مسایل مهندسی، از این مدل استفاده شده است. معادله حاکم بر جریان توربولانس همان معادله (۱) است به‌طوری که به‌جای متغیر عمومی  $f$  متغیرهای  $k$  و  $\epsilon$  قرار می‌گیرند. قابل ذکر است که ضریب‌های ثابت این مدل بر اساس جدول ۲ به دست می‌آید [۱۴].

### معادله‌های فاز مایع

معادله‌های حاکم بر حرکت قطره‌ها (مسیر و اندازه حرکت) در جهت‌های محوری و شعاعی عبارت‌اند از:

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

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

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

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

در رابطه‌های بالا  $k_d$  تاثیر نیروی برشی روی قطره‌ها بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_d = \frac{3}{4} C_D \frac{r}{r_d} \frac{1}{D_d} |\bar{V}_{rel}| \quad (6)$$

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

(۳) Bag Model

(۱) Broman, G.L. & Jonson, J.H

(۲) R. Reitz, R. Diwakar

جدول ۱- مقدارهای  $S_f$ ،  $S_{fd}$ ، برای کمیت‌های مختلف  $f$  با توجه به معادله (۱).

نوع معادله	$f$	$\Gamma$	$S_f$	$S_{fd}$
پیوستگی	L	0	0	$S_{md} = \frac{-p}{6dV_p} \frac{r_d}{dt} \sum_k N_{d,k} \left\{ \left( D_{d,k}^{n+1} \right)^3 - \left( D_{d,k}^n \right)^3 \right\}$
مومنتم درجهت محوری	U	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( m_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r m_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (m_{eff} \nabla u + pk)$	$S_{ud} = \frac{-p}{6dV_p} \frac{r_d}{dt} \sum_k N_{d,k} \left\{ \left( D_{d,k}^{n+1} \right)^3 u_{d,k}^{n+1} - \left( D_{d,k}^n \right)^3 u_{d,k}^n \right\}$
مومنتم در جهت شعاعی	V	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( m_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r m_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} (m_{eff} \nabla u + pk) - 2m_{eff} \frac{v}{r^2}$	$S_{ud} = \frac{-p}{6dV_p} \frac{r_d}{dt} \sum_k N_{d,k} \left\{ \left( D_{d,k}^{n+1} \right)^3 n_{d,k}^{n+1} - \left( D_{d,k}^n \right)^3 n_{d,k}^n \right\}$
معادله توربولانس k	K	$\mu_{eff} / \sigma_k$	G-pε	0
معادله توربولانس ε	ε	$\mu_{eff} / \sigma_\epsilon$	$\frac{k}{e} (C_{e1}G - C_{e2}pe)$	0
معادله انرژی (انتالپی h)	H	$\mu_{eff} / \sigma_h$	0	$S_{hd} = \frac{-p}{6dV_p} \frac{r_d}{dt} \sum_k N_{d,k} \left\{ \left( D_{d,k}^{n+1} \right)^3 (C_p T)_{d,k}^{n+1} - \left( D_{d,k}^n \right)^3 (C_p T)_{d,k}^n \right\}$
معادله جزء جرمی بخار سوخت	$f_{fuel}$	$\mu_{eff} / \sigma_f$	0	$S_{fd} = S_{md} = \frac{-p}{6dV_p} \frac{r_d}{dt} \sum_k N_{d,k} \left\{ \left( D_{d,k}^{n+1} \right)^3 - \left( D_{d,k}^n \right)^3 \right\}$

$$G = m_t \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{n}{r} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} (m \nabla \cdot u + rK)(\nabla \cdot u)$$

$$\mu_{eff} = \mu_{mol} + \mu_t$$

$$\mu_t = c_\mu \rho k^\nu / \epsilon$$

جدول ۲- ضریب‌های ثابت در مدل توربولانس k-ε استاندارد.

ضریب ثابت	$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
مقدار عددی	۰٫۰۹	۱٫۴۴	۱٫۹۲	-۰٫۳۷۳	۱٫۰	۱٫۲۲

جدول ۳- طبقه بندی حالت‌های مختلف بررسی شده براساس مطالعات پارامتریک (دمای اولیه محفظه = TTRAP و فشار اولیه محفظه = PTRAP).

Temp. Categ.	ISOTHERMAL CASES			NON-ISOTHERMAL								
	Ambient-temps			Low-Temps			Medium-Temps			High-Temps		
Case-No	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
$T_{trap}$ (k)	۲۹۰	۲۹۰	۲۹۰	۴۲۳	۴۲۳	۴۲۳	۵۷۳	۵۷۳	۵۷۳	۶۷۳	۶۷۳	۶۷۳
$P_{trap}$ (bar)	۴۵	۲۵	۵	۴۵	۲۵	۵	۴۵	۲۵	۵	۴۵	۲۵	۵

میدان حل به وسیله شبکه محاسباتی به تعداد مناسبی از حجم های کوچک تقسیم می شود. بنابراین، با این روش معادله عمومی (۱) به صورت زیر منفصل می شود.

$$\begin{aligned} & \left\{ (r_g q_f)_p^{n+1} - (r_g q_f)_p^n \right\} \frac{dV_p}{dt} + \quad (17) \\ & (r_g q u_g f a)_c^n - (r_g q u_g f a)_w^n + \\ & (r_g q v_g f a)_n^n - (r_g q v_g f a)_s^n = \\ & \left( \Gamma q \frac{df}{dx} a \right)_c^n - \left( \Gamma q \frac{df}{dx} a \right)_w^n + \\ & \left( \Gamma q \frac{df}{dx} a \right)_n^n - \left( \Gamma q \frac{df}{dx} a \right)_s^n + \\ & (q S_f)_p^{n+1} dV_p + (S_{fd}^{n+1})_p \end{aligned}$$

معادله (۱۷) برای همه معادله های فاز گاز به کار می رود. برای نمونه مؤلفه محوری معادله اندازه ی حرکت در فاز گاز به شکل ساده شده زیر در می آید:

$$\begin{aligned} A_p^{n+1} u_p^{n+1} &= \sum_c A_c^{n+1} u_c^{n+1} + S - \quad (18) \\ & \frac{p}{6} \frac{1}{dt} \sum_k N_{d,k} \{ r_{d,k}^{n+1} (D_{d,k}^3)^{n+1} u_{d,k}^{n+1} - \\ & r_{d,k}^n (D_{d,k})^n u_{d,k}^n \} \end{aligned}$$

که در این رابطه  $u_p$  سرعت فاز گاز در مرکز "المان حجم" بوده و  $u_c$  مؤلفه های محوری سرعت گاز در چهار نقطه مجاور و  $A_c$  ضریب های حاصل از اثرهای جابجایی (Convection) و نفوذ (Diffusion) و  $S$  شامل مقادیرهای گرادیان فشار و اندازه ی حرکت است. با تبادل اندازه ی حرکت فاز مایع و فاز گاز شکل نهایی و کاربردی معادله (۱۸) به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} [A_p^{n+1} + \frac{p}{6} \frac{1}{dt} \sum_k N_{d,k} (\frac{r_{d,k}^{n+1} (D_{d,k}^3)^{n+1}}{1 + dt.k^{n+1}})] u_p^{n+1} &= \quad (19) \\ \sum_c A_c^{n+1} u_c^{n+1} + S + \frac{p}{6} \frac{1}{dt} \sum_k N_{d,k} \{ r_{d,k}^n (D_{d,k}^3)^n u_{d,k}^n - \\ r_{d,k}^{n+1} (D_{d,k}^3)^{n+1} (\frac{u_{d,k}^n + dt.k^{n+1} u_p^{n+1}}{1 + dt.k^{n+1}}) \} \end{aligned}$$

معادله ی انرژی (انتالپی) با استفاده از روش حجم کنترل به صورت زیر منفصل می شود:

در این معادله  $Re$  عدد رینولدز و  $We$  عدد وبر هستند. زمان عمر ناپایداری قطره ها ( $t_s$ ) از معادله زیر به دست می آید [۱۶].

$$t_s = D_2 \left[ \frac{D_d}{2V_{rel}} \left( \frac{r_d}{r} \right) \right]^{0.5} \quad (12)$$

ثابت  $D_2$  در معادله بالا برابر ۰/۵ است [۱۶]. اگر یک بسته قطره ها دارای عمر زندگی بیش از  $t_s$  باشند همه قطره های داخل بسته به طور ناگهانی شکسته شده و به قطره های ریزتر تبدیل می شوند. با اعمال قانون بقای جرم برای حالت های قبل و بعد از شکست ( $\sum \dot{M} = \sum (\dot{M})$ ) تعداد قطره های جدید ( $N_d$ ) و قطر قطره ها بعد از شکست ( $D_{stab.}$ ) به صورت زیر به دست می آیند:

$$D_{stab.} = \frac{S^2}{r V_{rel}^3 m} \quad (13)$$

$$N_d' = \frac{N_d D_d^3}{D_{stab.}^3} \quad (14)$$

همچنین با اعمال قانون بقای اندازه ی حرکت برای حالت های قبل و بعد از شکست، معادله بین سرعت ها قبل از شکست ( $u_d$ ) و بعد از شکست ( $u_d'$ ) به صورت زیر به دست می آید:

$$u_d' = u_d \Delta V \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)  $\Delta V$  فاکتور موثر بوده و با اعمال قانون بقای انرژی و موازنه این قانون قبل و بعد از شکست، به صورت زیر به دست می آید:

$$\Delta V = 1 - \left( \frac{D_d}{D_{stab.}} - 1 \right) \left( \frac{3s}{2r_d D_d u_d^2} \right) \quad (16)$$

با توجه به اینکه  $\Delta V$  کوچکتر از واحد می باشد، بنابراین انتظار می رود سرعت قطره ها بعد از شکست کمتر از قبل از شکست باشد.

### انفصال معادله های حاکم

از آنجایی که معادله های حاکم بر فاز گاز و مایع در موتورهای دیزل پیچیده و غیر خطی اند، حل کامل آنها به روش تحلیلی غیر ممکن است. به این دلیل از روش عددی برای حل این معادله ها استفاده شد. برای تعیین جواب معادله های حاکم از روش های متعددی برای منفصل کردن این معادله ها و الگوریتم های متفاوتی برای حل آنها استفاده می شود. در این مقاله از روش حجم های محدود برای انفصال معادله ها استفاده شده است. در این روش

دارای جمله‌هایی مرکب از فشار و سرعت مرتبط به هم است لازم است این معادله‌ها توسط الگوریتم ویژه‌ای حل شوند. روش مرسوم برای حل این گونه معادله‌ها، روش‌هایی است که توسط احمدی، گاسمن و عیسی ارایه شد [۶]. اما در این تحقیق برای نخستین بار الگوریتم تعمیم یافته [۷] PISO برای جریان دو فاز با شرایط و فرضیه‌های داده شده اعمال شد. مراحل اجرای این الگوریتم به‌طور خلاصه در اینجا آمده است.

### مرحله تخمین میدان سرعت

میدان سرعت تخمینی  $V^*$  به‌وسیله حل معادله‌های اندازه‌ی حرکتی که ضریب‌های آن با توجه به شرایط مرزی و فرضیه‌ها داده شده معلوم‌اند، به‌دست می‌آید.

### مرحله اول تصحیح میدان سرعت و فشار

با حل معادله‌های اندازه‌ی حرکت که ضریب‌های آن با استفاده از میدان تخمینی محاسبه شده‌اند، میدان سرعت جدید  $V^{**}$  و فشار  $P^*$  به‌دست می‌آیند. به‌طوری که میدان سرعت به‌دست آمده در معادله پیوستگی صدق کند.

### مرحله دوم میدان سرعت و فشار

مشابه مرحله قبل و با استفاده از میدان فشار و سرعت مرحله نخست میدان سرعت  $V^{***}$  و فشار  $P^{**}$  محاسبه می‌شوند. حال با توجه به سه مرحله ذکر شده، می‌توان جزئیات و رابطه‌های حاکم بر آن را به صورت زیر نوشت:

الف) موقعیت همه قطره‌ها در مرحله تخمین با توجه به معادله‌های (۲) و (۳) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$x_d^* = x_d^0 + (dt) u_d^0 \quad (۲۷)$$

$$r_d^* = r_d^0 + (dt) v_d^0 \quad (۲۸)$$

همچنین سرعت همه قطره‌ها در این مرحله با توجه به معادله‌های (۴) و (۵) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$u_d^* = \frac{u_d^0 + k_d^0 dt (u^0 + u^0) + dt S_{ud}^0}{dt k_d^0 + 1} \quad (۲۹)$$

$$v_d^* = \frac{v_d^0 + k_d^0 dt (v^0 + v^0) + dt S_{vd}^0}{dt k_d^0 + 1} \quad (۳۰)$$

ب) با توجه به محاسبه سرعت قطره‌ها و اعمال آن در معادله‌های اندازه‌ی حرکت، مؤلفه‌های سرعت فاز گاز، در مرحله تخمین از معادله‌های زیر به‌دست می‌آیند:

$$(r_g q)^{n+1} \frac{dV_p}{dt} (h_g)_p^{n+1} = A_E (h_g)_E^n + \quad (۲۰)$$

$$A_W (h_g)_W^n + A_N (h_g)_N^n + A_S (h_g)_S^n + A_P (h_g)_P^n - \left[ \frac{p}{6} \frac{r_d}{dt} \sum_k \left[ N_{d,k} \{ (D_{d,k}^{n+1})^3 (C_p T_{d,k})^{n+1} - (D_{d,k}^n)^3 (C_p T_{d,k})^n \} \right] \right]$$

قابل ذکر است معادله‌های توربولانس  $k$  و  $e$  و همچنین معادله جزء جرمی بخار سوخت  $(f)$  به روش مشابه بالا منفصل می‌شوند. برای نمونه انفصال معادله  $(f)$  به صورت زیر است:

$$(r_g q)^{n+1} \frac{dV_p}{dt} (f)_p^{n+1} = A_E (f)_E^n + \quad (۲۱)$$

$$A_W (f)_W^n + A_N (f)_N^n + A_S (f)_S^n + A_P (f)_P^n -$$

$$\left[ \frac{p}{6} \frac{r_d}{dt} \sum_k \left[ N_{d,k} \{ (D_{d,k}^{n+1})^3 - (D_{d,k}^n)^3 \} \right] \right]$$

معادله‌های مسیر و اندازه‌ی حرکت و معادله‌ی بقای جرم و انرژی برای فاز مایع با استفاده از روش تفاوت محدود به‌طور کامل اویلری منفصل شده و در محاسبه‌های اسپری مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای نمونه معادله منفصل شده مسیر و اندازه‌ی حرکت به صورت زیر هستند:

$$x_d^{n+1} = x_d^n + u_d^{n+1} dt \quad (۲۲)$$

$$r_d^{n+1} = r_d^n + v_d^{n+1} dt \quad (۲۳)$$

$$u_d^{n+1} = u_d^n + k_d^{n+1} dt \left[ (u_g + u_g')^{n+1} - u_d^{n+1} \right] \quad (۲۴)$$

$$v_d^{n+1} = v_d^n + k_d^{n+1} dt \left[ (v_g + v_g')^{n+1} - v_d^{n+1} \right] \quad (۲۵)$$

در رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) مقدار  $k_d^{n+1}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_d^{n+1} = \frac{3}{4} c_D \frac{r_g}{r_d} \frac{1}{D_d} \left\{ [(u_g + u_g' - u_d)^2 + (v_g + v_g' - v_d)^2]^{1/2} \right\}^n \quad (۲۶)$$

قابل ذکر است معادله‌های بقای جرم وانرژی قطره‌ها نیز به روش مشابه منفصل گشته و وارد دستگاه معادله‌ها می‌شوند. معادله‌های منفصل شده با استفاده از الگوریتم PISO حل می‌شوند.

## الگوریتم PISO

با توجه به اینکه معادله‌های حاکم بر مسأله غیر خطی بوده و

قطره‌ها با محیط اطراف که شامل: تبادل اندازه‌ی حرکت، جرم، انرژی و توربولانس باشد، نیز اعمال شده است.

تزیق اسپری در مدت زمان ۱/۴ میلی ثانیه بوده و همچنین شبکه محاسبه‌هایی که دارای ۹۰۰ گره (۳۰×۳۰) می‌باشد، برای بررسی اسپری به کار رفته است. در محلی که اسپری پاشیده می‌شود یا وجود اسپری بیشتر است، شبکه محاسباتی ریزتر است، چون اهمیت این مکان بیشتر است (شکل ۳).

نتیجه‌های به دست آمده از این تحقیق براساس ۱۲ حالت متفاوت دما و فشار محفوظه است که در جدول ۳ آمده است. در همه این حالت‌ها فرض می‌شود که جت مایع با تقارن محوری درون محفوظه پاشیده شده و با هوا مخلوط می‌شود. معادله‌ها با روش عددی حجم‌های محدود منفصل شده و در انتهای مرحله تراکم از گام زمانی کوچکتری استفاده می‌شود. به واسطه این‌که قطره‌ها بدون برهم‌کنش هستند، لذا همه معادله‌ها به نوبت برای هر قطره قابل حل هستند.

تأثیر دما و فشار اولیه محفوظه بر ساختار فیزیکی اسپری در شکل ۴ ملاحظه می‌شود. به طوری که در این شکل دیده می‌شود هرچه فشار محفوظه کمتر و دمای محفوظه بیشتر باشد، میزان نفوذ قطره‌ها بیشتر است.

اثر نفوذ قطره‌ها بر خط‌های جریان و بردار سرعت و در نهایت تأثیر نفوذ بر شدت اغتشاش در شکل ۵ ملاحظه می‌شود. این شکل تأثیر قطره‌های سوخت مایع بر خط‌های جریان و بردار سرعت در زمان ۱/۴ میلی ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هرچه قطره در محفوظه بیشتر نفوذ کند خط‌های جریان و بردار سرعت بیشتری را تحت تأثیر خود قرار داده و شدت اغتشاش جریان بیشتر می‌شود.

شکل ۶ الگوی اسپری<sup>(۲)</sup> (نمایش حرکت اسپری) به دست آمده به کمک کدهای متفاوت (EPISO-II و KIVA) و هم‌چنین نتیجه‌های حاصل از داده‌های تجربی را نشان می‌دهد، که همگی در شرایط یکسان هستند. با مقایسه کیفی این الگوها، می‌توان نتیجه گرفت که کد (EPISO-II) مدل اسپری قابل قبول‌تری دارد و به مدل تجربی نزدیک‌تر است، به‌ویژه زمانی که ساختار اسپری تکمیل شده و خطای لحظه اولیه ناچیز باشد.

حرکت کلی اسپری در مدل واقعی محفوظه احتراق که شامل سیلندر، پیستون و انژکتور باشد در شکل ۷ ملاحظه می‌شود. با توجه

$$A_p^u u_p^* = \sum_c A_c u_c^* - (P_p^{\#} - P_w^{\#}) a_{n-s} + S_u^u + A_p u_p^o \quad (31)$$

$$A_p^v v_p^* = \sum_c A_c v_c^* - (P_p^{\#} - P_w^{\#}) a_{e-w} + S_u^v + A_p v_p^o \quad (32)$$

ج) موقعیت و سرعت قطره‌ها در نخستین مرحله اصلاح به صورت زیر است:

$$x_d^{**} = x_d^o + (dt) u_d^* \quad (33)$$

$$r_d^{**} = r_d^o + (dt) v_d^* \quad (34)$$

$$u_d^{**} = \frac{u_d^o + k_d^* dt (u^* + u') + dt S_{ud}^*}{dt k_d^* + 1} \quad (35)$$

$$v_d^{**} = \frac{v_d^o + k_d^* dt (v^* + v') + dt S_{vd}^*}{dt k_d^o + 1} \quad (36)$$

در رابطه‌های بالا  $v'$ ،  $u'$ ،  $v'$  نوسان‌های سرعت هستند که از توابع توزیع آماری دوکاوینکز<sup>(۱)</sup> [۱۷] به دست می‌آیند.

معادله مرحله نخست تصحیح فشار به صورت خطی زیر است:

$$A_p^p P_p' = \sum_c A_c^p P_c' + S_u^p + S_m^d \quad (37)$$

اکنون با قراردادن چگالی و فشار جدید در معادله‌های اندازه‌ی حرکت می‌توان، میدان سرعت جدید  $u^{**}$ ،  $v^{**}$  را اصلاح کرد.

د) موقعیت و سرعت قطره با جای‌گذاری  $u^{**}$ ،  $v^{**}$  به جای  $u^*$ ،  $v^*$  برای بار دوم اصلاح می‌شود (مشابه مرحله قبل).

اکنون با دو مرحله اصلاح پارامترهای متفاوت، می‌توان درصد جرمی بخار سوخت را با توجه به رابطه زیر محاسبه کرد:

$$A_p^f f_p^* = \sum_c A_c^f f_c^* + A_p^o f_p^o + q S_u^{-f} + S_m^{-d} \quad (38)$$

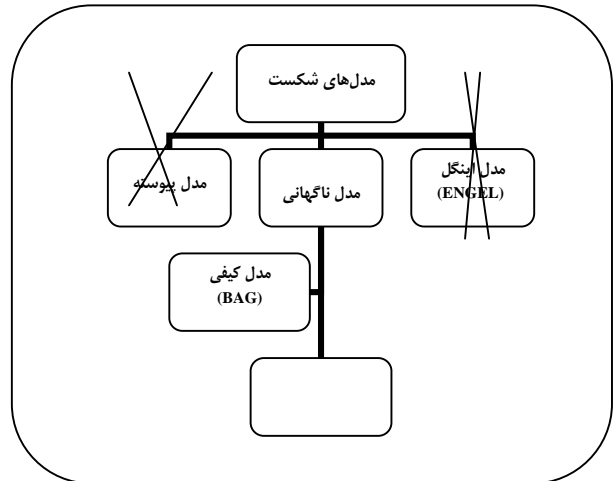
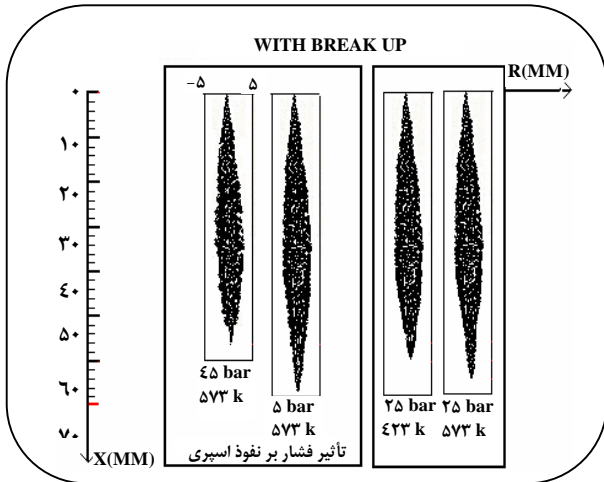
در نهایت می‌توان نشان داد بعد از دوم مرحله تصحیح متوالی، جواب‌های به دست آمده دارای دقت قابل قبولی هستند [۶].

## نتایج و بحث

در این تحقیق رفتار اسپری در محفوظه استوانه‌ای شکل که قطر دهانه آن ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱۱ سانتی‌متر است، بررسی شد (شکل ۲). هم‌چنین فرض شده است که یک انژکتور در مرکز دهانه استوانه قرار دارد و قطر آن ۰/۲۱۳ میلی‌متر است و نیز فشار سوزن انژکتور ۲۲۰ bar و نسبت طول به قطر آن ۳/۶ است. همه محاسبه‌ها براساس تقارن محوری انجام شده و فعل و انفعالات

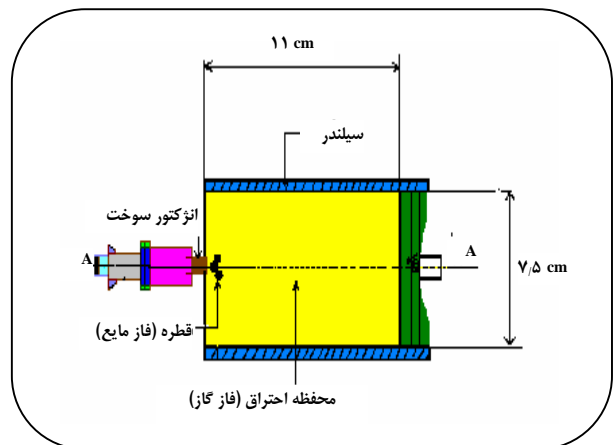
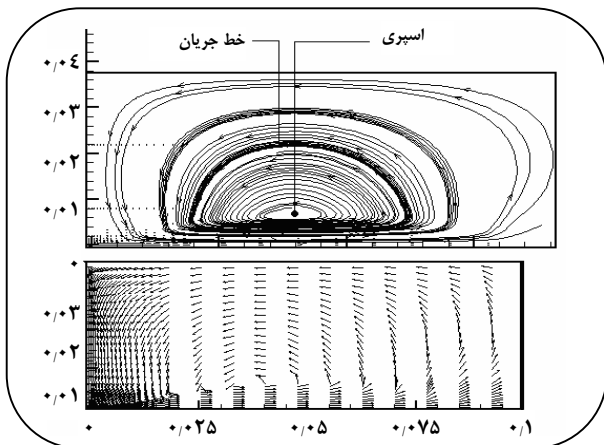
(۱) Dukwicz

(۲) Spray patterns



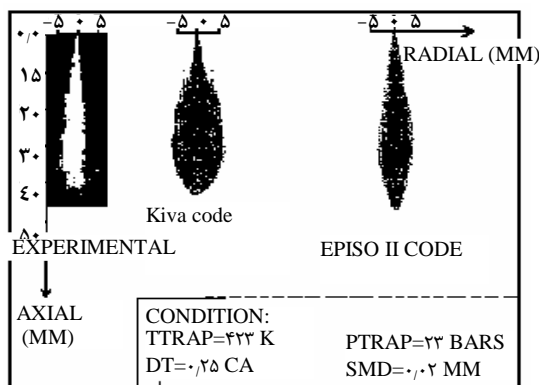
شکل ۱- مدل های متفاوت شکست قطره ها [۱۶].

شکل ۴- ساختار فیزیکی اسپری در فشارودمای متفاوت محفظه (در زمان ۱ میلی ثانیه).

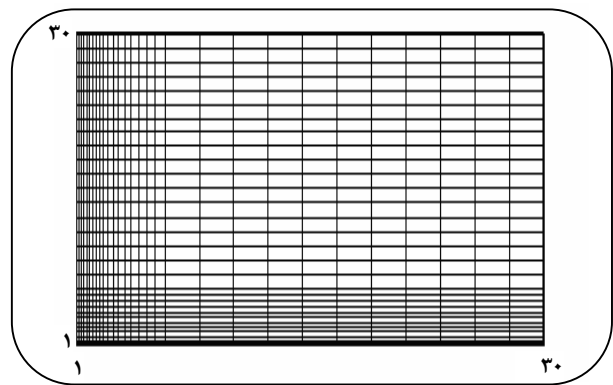


شکل ۲- نمایش کلی حرکت اسپری در محفظه احتراق با حجم ثابت.

شکل ۵- تاثیر قطره های سوخت بر خطوط جریان و بردار سرعت (در زمان ۱/۴ میلی ثانیه).



شکل ۶- الگوی نمایش حرکت اسپری با استفاده از کدهای متفاوت و نتیجه های تجربی.



شکل ۳- شبکه محاسباتی به کار رفته در محفظه ای با حجم ثابت.



به شکل می توان گفت که خطهای جریان به طور کامل تحت تأثیر از سرعت و موقعیت فیزیکی قطره ها است. تاثیر وجود قطره ها سوخت بر شدت توربولانس و نرخ اضمحلال توربولانس را می توان در شکل ۸ ملاحظه کرد. در این جا کانتورهای توربولانس و نرخ اضمحلال آنها رسم شده است. قابل ذکر است که شدت توربولانس در مجاورت قطره ها بیشترین مقدار و هرچه از قطره ها دورتر می شود مقدار کمتری دارد.

شکل ۹ تاثیر اعمال یا عدم اعمال مدل شکست قطره ها بر ساختار اسپری را نشان می دهد. این شکل در شرایطی نشان داده شده که فشار و دمای اولیه محفظه به ترتیب ۲۵ بار و ۲۹۰ کلوین بوده و زمان پاشش ۱/۱ میلی ثانیه باشد. از این شکل می توان نتیجه گرفت که با اعمال مدل شکست، قطره ها ریزتر شده و میزان تبخیر نیز بالاتر می رود.

اثر گام زمانی بر میزان نفوذ اسپری نسبت به زمان پاشش در شرایطی که تعداد قطره ها اضافه شده در هر گام زمانی ۲ عدد بوده و مدل شکست نیز در سیستم اعمال می شود، در شکل ۱۰ ملاحظه می شود. در اینجا فرض شده است که دمای محفظه و دمای دیواره (بیستون و سرسیلندر) ثابت باقی بماند (ایزوترمال). زمان پاشش از ۰/۱۲۵ الی ۰/۵ زاویه چرخش میل لنگ در حال تغییر است. قطر قطره ها و قطر نازل به ترتیب ۵۰ میکرومتر و ۰/۲۱۳ میلی متر هستند. به طوری که در این نمودار مشاهده می شود اثر گام زمانی بر میزان نفوذ اسپری بسیار ناچیز است.

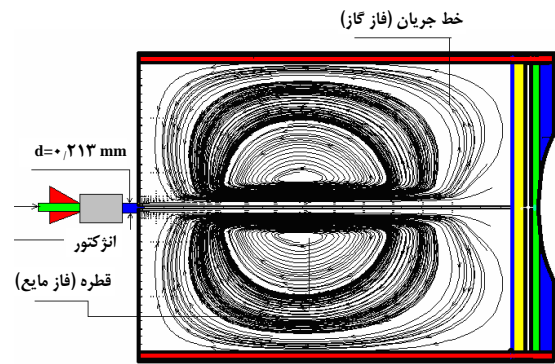
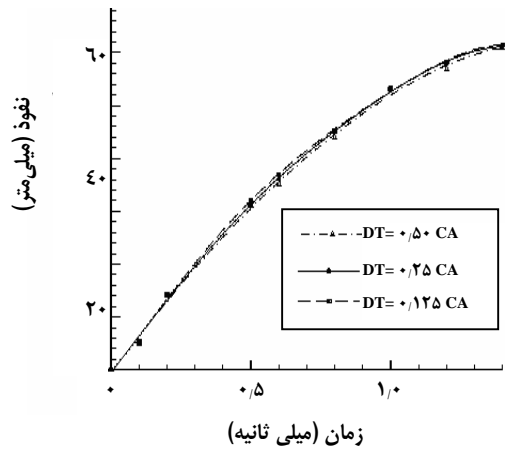
همچنین اثر گام زمانی بر جرم کلی تبخیر نسبت به زمان پاشش در شرایطی که تعداد قطره های اضافه شده در هر گام زمانی ۲ عدد بوده و مدل شکست اعمال شده در مرحله قبل نیز حذف شود در شکل ۱۱ ملاحظه می شود. در اینجا فرض شده که دمای محفظه و دمای دیواره (بیستون و سرسیلندر) ثابت باقی بماند (ایزوترمال) و زمان پاشش از ۰/۱۲۵ الی ۰/۵ زاویه چرخش میل لنگ در حال تغییر باشد و نیز قطر قطره ها و قطر نازل به ترتیب ۵۰ میکرومتر و ۰/۲۱۳ میلی متر در نظر گرفته شود. با توجه به نمودار می توان نتیجه گرفت که اولاً اثر گام زمانی بر جرم کلی تبخیر بسیار ناچیز است ثانیاً می توان دریافت که معقول ترین گام زمانی برای بررسی رفتار اسپری، گام زمانی CA ۰/۲۵ است.

قابل ذکر است که اثر تعداد قطره های اضافه شده در هر گام زمانی بر نفوذ اسپری نسبت به زمان پاشش در محفظه احتراق برای شرایطی که تعداد قطره های اضافه شده از ۲ به ۵ عدد

در حال تغییر باشد و دمای محفظه به دما با دمای محفظه باشد، در شکل ۱۲ مشاهده می شود. در اینجا زمان پاشش ۰/۲۵ زاویه چرخش میل لنگ و دمای محفظه احتراق ۵۷۳ درجه کلوین است. به طوری که از این نمودار مشاهده می شود به دلیل فرض همگن و یکنواختی قطره ها در روش عددی، نتیجه های روش های عددی و تجربی در لحظه اولیه پاشش اندکی نسبت به هم تفاوت دارند. شکل ۱۳ اثر تعداد قطره های اضافه شده در هر گام زمانی بر جرم کلی تبخیر نسبت به زمان پاشش در محفظه احتراق برای شرایطی که تعداد قطره های اضافه شده از ۲ به ۵ عدد در حال تغییر باشد و دمای دیواره هم دما با دمای محفظه باشد را نشان می دهد. در اینجا زمان پاشش ۰/۲۵ زاویه چرخش میل لنگ و دمای محفظه احتراق ۵۷۳ درجه کلوین است.

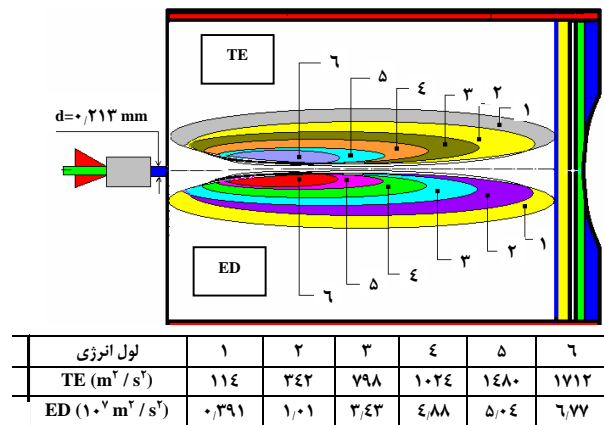
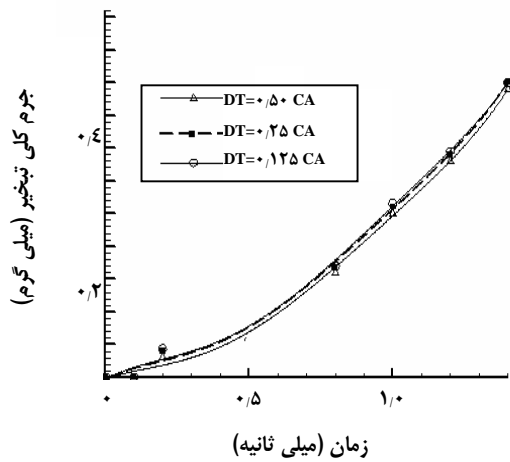
از دو نمودار اخیر می توان نتیجه گرفت که تعداد قطره های اضافه شده در هر گام زمانی بر میزان نفوذ اسپری نیز اثر چندانی ندارد. تاثیر دمای اولیه محفظه بر نفوذ اسپری نسبت به زمان پاشش با اعمال مدل شکست در شکل ۱۴ رسم شده است. در این نمودار مدت زمان پاشش قطره ها ۰/۲۵ زاویه چرخش میل لنگ بوده و تعداد قطره های اضافه شده ۲ عدد در هر گام زمانی، قطر نازل ۰/۲۱۳ میلی متر و قطر متوسط قطره ها ۲۰۰ میکرومتر است. به طوری که در این نمودار ملاحظه می شود، زمانی که  $t < 4 \times 10^{-4}$  ثانیه باشد، با افزایش دما، میزان نفوذ قطره ها نیز افزایش می یابد. تاثیر دمای اولیه محفظه بر جرم کلی تبخیر با فشار ۲۵ بار در شکل ۱۵ دیده می شود. با توجه به شکل می توان گفت در گستره دمای ویژه تغییرهای شدت تبخیر نسبت به زمان قابل مقایسه است. برای مثال در دمای پایین (پایین تر از ۴۲۳ کلوین) تغییرهای شدت تبخیر بسیار ناچیز می باشد، یعنی در دمای پایین مقایسه معنی ندارد.

اثر فشار اولیه محفظه بر نفوذ قطره ها در حالت غیرایزوترمال و بدون اعمال مدل شکست در شکل ۱۶ رسم شده است. در اینجا دمای اولیه محفظه ۵۷۳ درجه کلوین ثابت می ماند اما، فشار از ۵ به ۴۵ bar افزایش می یابد. با توجه به نمودار، می توان دریافت که با افزایش فشار، شدت نفوذ قطره ها کاهش می یابد. اثر قطر قطره ها بر جرم کلی تبخیر در شکل ۱۷ دیده می شود. به طوری که قطر قطره ها از ۵ تا ۲۰۰ میکرومتر تغییر کرده، تعداد قطره های اضافه شده در هر گام زمانی ۲ عدد بوده و بدون اعمال مدل شکست، محاسبه ها انجام شد. در شکل ۱۸ اثر قطر قطره های



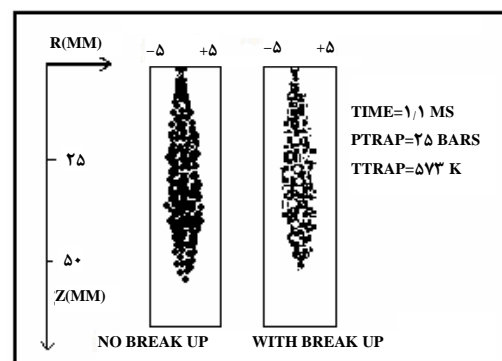
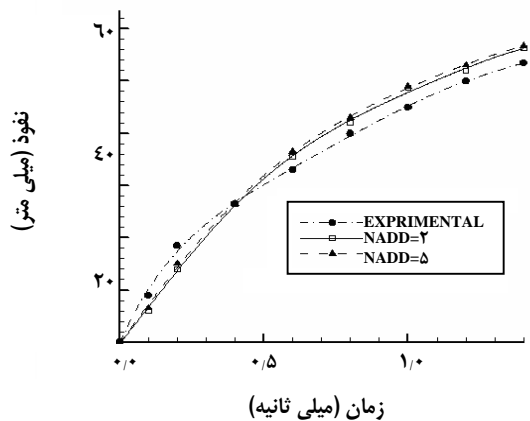
شکل ۷- نمایش حرکت اسپری در محفظه احتراق و تاثیر آن بر خطهای جریان.

شکل ۱۰- اثر گام زمانی بر میزان نفوذ اسپری.



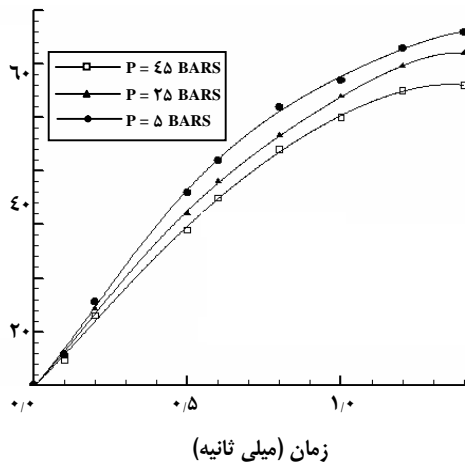
شکل ۸- کانتور توربولانس و نرخ اضمحلال آن در محفظه.

شکل ۱۱- اثر گام زمانی بر جرم کلی تبخیر.

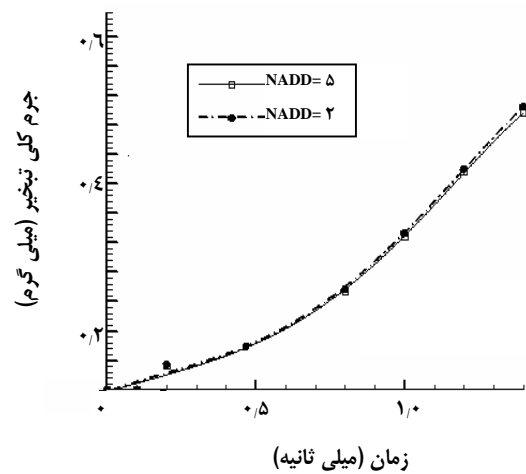


شکل ۱۲- اثر تعداد قطره‌های اضافه شده در هر گام زمانی بر نفوذ اسپری.

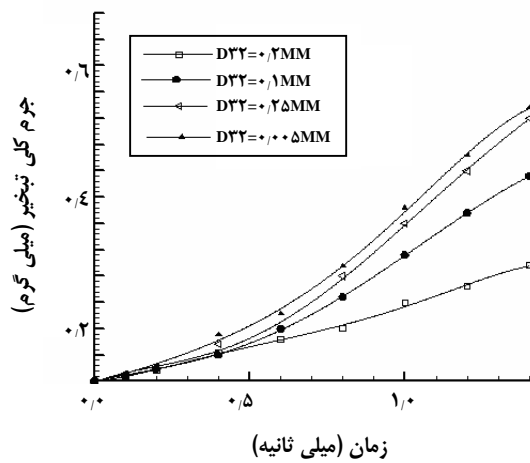
شکل ۹- تاثیر مدل شکست قطره‌ها بر ساختار اسپری.



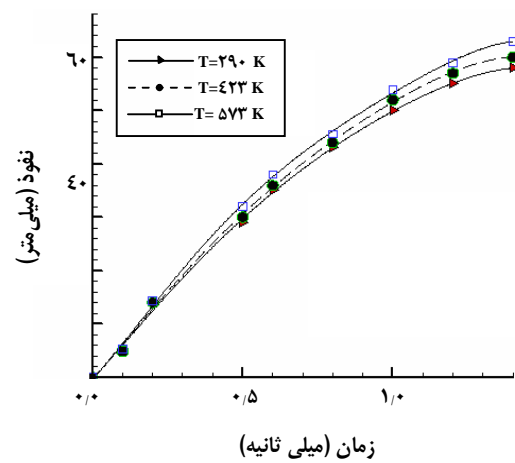
شکل ۱۶- تاثیر فشار اولیه محفظه بر نفوذ قطره‌ها.



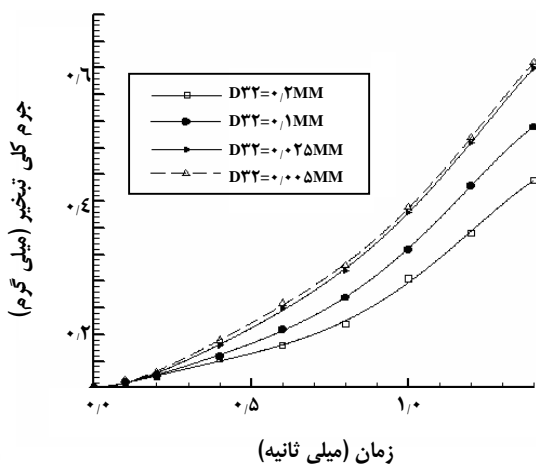
شکل ۱۳- اثر تعداد قطره‌های اضافه شده در هر گام زمانی بر جرم کلی تبخیر.



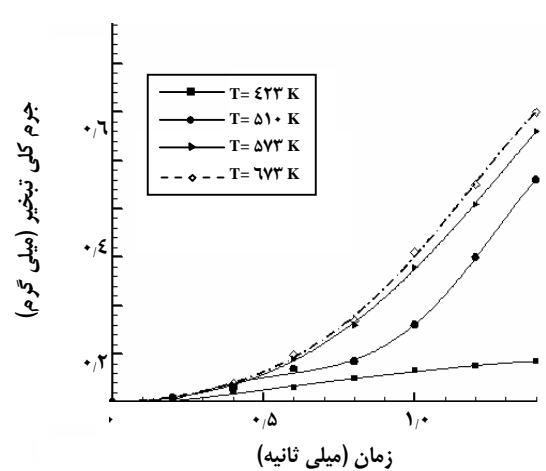
شکل ۱۷- تاثیر قطر قطره‌ها بر جرم کلی تبخیر بدون اعمال مدل شکست.



شکل ۱۴- تاثیر دمای اولیه محفظه بر نفوذ قطره‌ها.



شکل ۱۸- تاثیر قطر قطره‌ها بر جرم کلی تبخیر با اعمال مدل شکست.



شکل ۱۵- تاثیر دمای اولیه محفظه بر جرم کلی تبخیر (در  $D_{32} = 0.50 \text{ MM}$ ).

۳- با اعمال مدل شکست، قطر اولیه قطره‌ها از ۵ تا ۲۵ میکرومتر تاثیر چندانی بر جرم کلی تبخیر ندارد یعنی قطره‌ها با این سایز (اندازه) به تقریب به صورت بخار در نظر گرفته می‌شوند.

۴- بدون اعمال مدل شکست جرم کلی تبخیر به شدت وابسته به قطر اولیه قطره‌ها است.

۵- از آنجایی که قطره‌ها در مدل‌سازی عددی به‌طور کامل کروی در نظر گرفته می‌شوند میزان نفوذ اسپری در ابتدای زمان حرکت با داده‌های تجربی اندکی مغایرت دارد.

۶- گام زمانی معادل  $0.25 CA$  معقول‌ترین گام برای بررسی رفتار اسپری است و گام زمانی کوچکتر از  $0.25 CA$  بر میزان نفوذ و تبخیر اسپری تاثیر چندانی ندارد.

۷- میزان نفوذ قطره‌ها در حالت بدون شکست، بیش از میزان نفوذ در حالت شکست است، اما تبخیر قطره‌ها برعکس است.

۸- با اعمال مدل شکست رفتار قطره‌ها در محفظه بعد از لحظات اولیه مستقل از چگونگی تولید و توزیع آنها در نازل است.

۹- تعداد قطره‌های اضافه شده در هر گام زمانی تاثیر چندانی بر نفوذ و جرم کلی تبخیر ندارد.

### فهرست علائم

a,A	سطح مقطع ( $m^2$ )، ضریب معادله منفصل شده
$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kg k)
CA	زاویه دوران میل لنگ
$C_D$	ضریب نیروی درگ (بازدارنده)
D	ضریب پخش ( $m^2/s$ )
f	درصد جرمی بخار سوخت
$D_d$	قطر قطره (m)
$D_{32}$	قطر متوسط قطره‌ها (m)
DT	فاصله زمانی برحسب زاویه چرخش میل لنگ
DINJ	قطر انژکتور (mm)
Ev	تبخیر (mg)
G	نرخ ایجاد انرژی جنبشی توربولانس
$k=TE$	انرژی جنبشی توربولانس ( $m^2/s^2$ )
m	جرم (kg)
N	تعداد کل قطره‌ها
NADD	تعداد قطره‌های اضافه شده در هر گام زمانی
Nu	عدد ناسلت

ورودی بر جرم کلی تبخیر، با اعمال مدل شکست مورد بررسی قرار گرفته است. از شکل‌های ۱۷ و ۱۸ می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر اعمال وعدم اعمال مدل شکست بر جرم کلی تبخیر دارای اهمیت است. به طوری که با اعمال مدل شکست میزان تبخیر بازای قطره‌های متفاوت یکنواخت‌تر و منحنی‌های تبخیر نیز به هم نزدیک‌ترند به‌ویژه زمانی که قطر قطره‌ها کوچک باشد.

شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ تاثیر قطر قطره‌ها بر میزان نفوذ اسپری با و بدون اعمال مدل شکست را نشان می‌دهند. از این شکل‌ها نتیجه می‌شود که قطره‌ها با قطر کمتر و ریزتر شبیه جریان گاز عمل کرده و همراه آن حرکت می‌کنند. همچنین قطره‌های ریزتر دارای نفوذ کمتر و قطره‌های درشت‌تر دارای نفوذ بیشتر هستند. با اعمال مدل شکست، قطره‌ها ریزتر شده و میزان نفوذ نیز کمتر می‌شود. از آنجایی که در مدل واقعی (مدل تجربی) شکست قطره‌ها نیز منظور می‌شود نتیجه‌های به‌دست آمده با اعمال مدل شکست به داده‌های تجربی نزدیک‌تر می‌باشد. این نکته مهم در این تحقیق به‌طور کامل مشهود است.

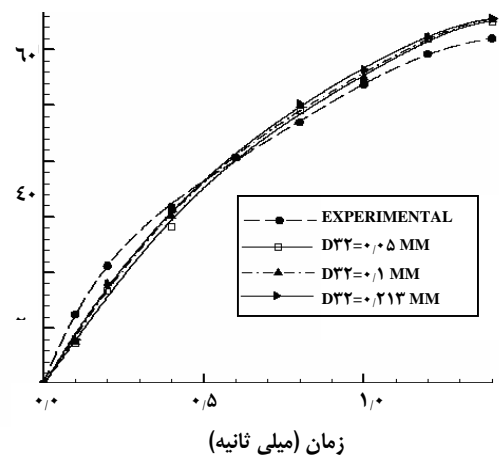
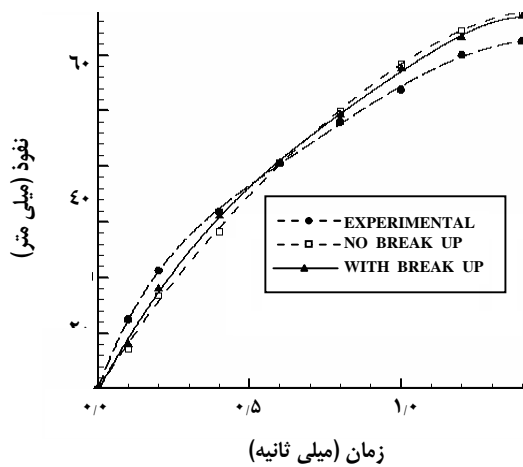
اثر قطر قطره‌ها بر جرم کلی تبخیر در حالت‌هایی که همراه با اعمال مدل شکست و عدم اعمال آن باشد در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ دیده می‌شود. از این دو شکل نتیجه می‌شود هرچه قطر قطره‌ها بیشتر شود، تفاوت بین مدل شکست و بدون شکست بیشتر می‌شود، و هرچه قطره‌ها ریزتر شوند میزان تبخیر آنها نیز بالاتر می‌رود.

تاثیر شبکه محاسباتی بر نفوذ و تبخیر اسپری به ترتیب در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ ملاحظه می‌شود. با توجه به شکل می‌توان دریافت که با افزایش شبکه، دقت محاسباتی نیز افزایش می‌یابد، اما این تغییرها بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. بنابراین، شبکه  $30 \times 30$  در این محاسبه‌ها منظور شد.

### نتیجه گیری

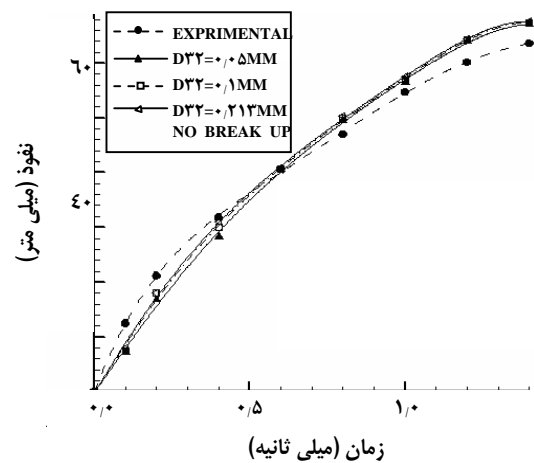
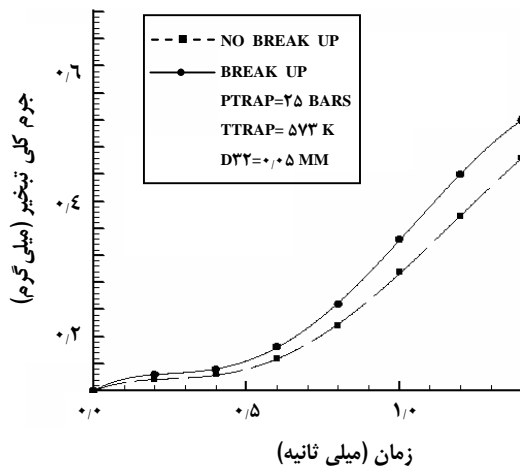
نتیجه‌های حاصل از این تحقیق که به روش عددی به‌دست آمده نشان می‌دهد که:

- ۱- تاثیر فشار اولیه محفظه بر نفوذ اسپری بیش از تاثیر دمای اولیه محفظه و پارامترهای فیزیکی دیگر است.
- ۲- نتیجه‌های به‌دست آمده از این کد با نتایج تجربی موجود نزدیک‌تر می‌باشد. در برخی از موارد ساختار اسپری قابل قبول‌تری به نمایش می‌گذارد.



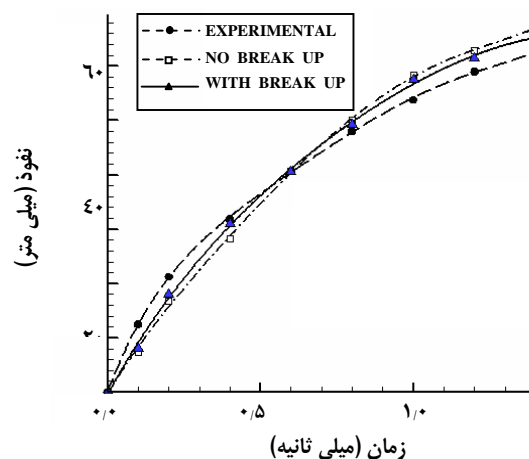
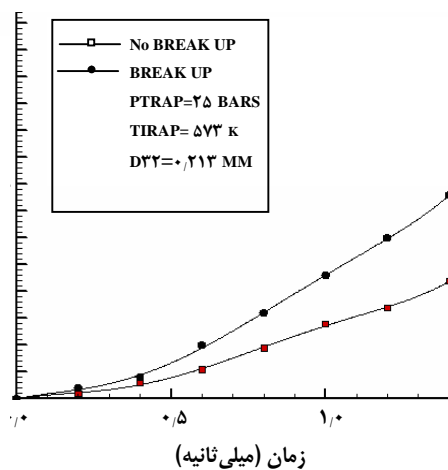
شکل ۱۹- تاثیر قطر قطره‌ها بر نفوذ اسپری با اعمال مدل شکست.

شکل ۲۰- تاثیر قطر قطره‌ها بر نفوذ اسپری بدون اعمال مدل شکست.



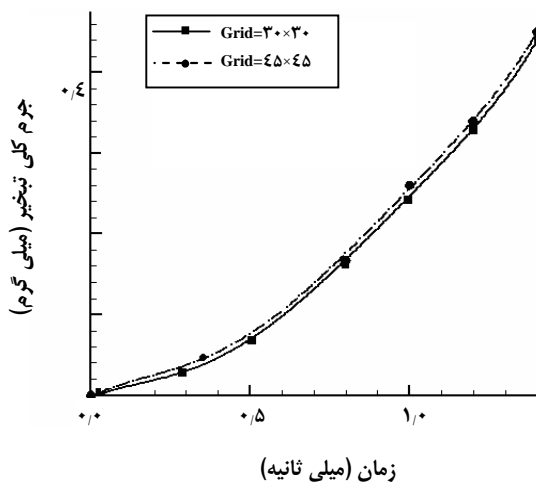
شکل ۲۱- تاثیر اعمال و عدم اعمال مدل شکست بر جرم کلی تبخیر (د. ۵۰ میکرومتر).

شکل ۲۲- تاثیر قطر قطره‌ها بر نفوذ اسپری بدون اعمال مدل شکست.

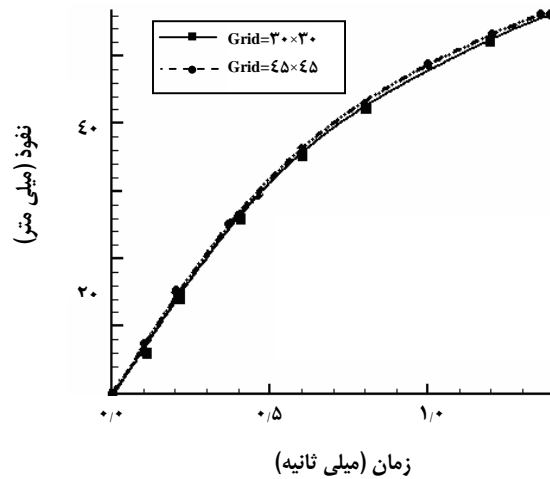


شکل ۲۳- تاثیر اعمال و عدم اعمال مدل شکست بر جرم کلی تبخیر (در ۲۱۳ میکرومتر).

شکل ۲۴- تاثیر اعمال و عدم اعمال مدل شکست بر نفوذ اسپری (در ۵۰ میکرومتر).



شکل ۲۶- تاثیر شبکه محاسباتی بر تبخیر اسپری.



شکل ۲۵- تاثیر شبکه محاسباتی بر نفوذ اسپری.

$\rho$	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$Pr$	عدد پرانتل
$\mu$	لزجت ( $\text{kg/ms}$ )	$P$	فشار (Pa) و نفوذ (mm)
$\theta$	نسبت فضای اشغال شده	$R, r$	شعاع (m)
$\Gamma$	ضریب پخش (واحد آن وابسته به معادله بقای مربوط)	$S$	جمله منبع
$\pi$	عدد پی ( $3/14$ )	$Sh$	عدد شروود
$\sigma$	نیروی کشش سطحی ( $\text{N/m}$ )	$SMD$	قطر متوسط قطره‌ها (m)
		$T$	دما (k)
		$t$	زمان (s)
		$TTRAP$	دمای اولیه محفظه (K)
		$PTRAP$	فشار اولیه محفظه (Bar)
		$u$	سرعت محوری ( $\text{m/s}$ )
		$v$	سرعت شعاعی ( $\text{m/s}$ )
		$V$	حجم ( $\text{m}^3$ )
		$x$	فاصله محوری (m)
		$y$	فاصله عمودی (m)
			<b>علایم یونانی</b>
		$\delta_x$	طول محوری سلول (m)
		$\delta_r$	طول شعاعی سلول (m)
		$\delta_t$	مرحله زمانی (S)
		$\sigma$	عدد پرانتل مغشوش
		$\delta V$	حجم سلول ( $\text{m}^3$ )
		$\varepsilon=ED$	نرخ اتلاف توربولانس ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )
		$\phi$	متغیر عمومی

**زیر نویس‌ها**

$d$	مربوط به قطره
$eff$	مربوط به مقدارهای موثر
$f$	مربوط به سوخت
$mol$	مربوط به مقدارهای مولکولی
$g$	مربوط به گاز
$h$	مربوط به انتقالی
$k$	مربوط به انرژی جنبشی توربولانس
$m$	مربوط به مقدار متوسط و مربوط به جرم
$P$	مربوط به سلول مرکزی
$u, v$	مربوط به سرعت شعاعی و محوری
$r$	در جهت شعاعی
$rel$	مربوط به سرعت نسبی
$s$	مربوط به اسپری
$t$	مربوط به جریان توربولانس
$stab$	مربوط به پایداری قطره‌های
$v, s$	بخار در سطح قطره

n	مربوط به مقادیرهای جدید (new)	$v, \infty$	بخار در شرایط دوردست
*	مقدار حدسی	$\phi$	مربوط به متغیر عمومی
/	مربوط به نوسانات جریان و اصلاحات الگوریتم	$k, \varepsilon$	نرخ اتلاف و نرخ انرژی توربولانس
-	مربوط به متوسط		

### بالا نویسی‌ها

		$n+1, n$	مراحل زمانی قبلی و بعدی
		#	مربوط به اصلاح پارامتر

تاریخ دریافت: ۱۳۸۰/۱۰/۲۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۱/۶/۱۶

### مراجع

- [1] Gosman, A.D. and Watkins, A. P., The EPISO Computer Codes for Prediction of Laminar and Turbulent Flow in Diesel Engine Combustion, *Imp. Coll., Mech. Eng. Dept.*, (1973).
- [2] Gosman, A.D., Johns, J. R. and Watkins, A. P., Computer Analysis of Fuel-Air Mixing in Direct-Injection Engines, *SAE 800091*, (1980).
- [3] Watkin, A.P and Khaleghi, H., "Three -Dimensional Diesel Engine Spray Modeling", *Mech. Int. Sump. On Computers in Engine Technology, Cambridge*, (1987).
- [4] Khaleghi, H. and Watkins, A. P., Calculation of 3D diesel sprays into curvilinear piston bowls, *ASME Semp. On Auto. Engine Tech., Paper No. 87- FE-I, Dallas*, (1987).
- [5] Amsden, A. A., O'Rourke P. J. and Butler, T. D , " KIVA-TWO a Computer Program for Chemically Reactive Flows With Spray ", Los Alamos National Laboratory Report LA - 11560-MS , (1989).
- [6] Ahmadi, B. ,Gosman, A.D., Issa, R.I. and Watkins, A. P., EPISO -An Implicit Non-Iterative Solution Procedure for the Calculation of Flows in Reciprocating Engine Chamber, *Comput. Methods Appl. Mech.Eng.*, **79**, p. 249, (1990).
- [7] Watkins, A.P. and Khaleghi, H. ,Modeling Diesel Spray Evaporation Using a Non -Iterative Implicit Solution Scheme, *J. of Appl. Math. Modeling*, **14**, (1990).
- [8] Tehrani, M. and Khaleghi, H., Numerical Modeling of Spray Using Droplet Break Up Models, MSc Thesis, Amir Kabir University ,Tehran, Iran, (1992).
- [9] Khaleghi,H. and Tehrani,M. Numerical Modeling of Spray Break Up in Cold and Quiescent Chamber, Proc. ISME, Tehran, Iran, May (1994).
- [10] Khaleghi,H. and Ganji, D. D. ,Modeling Physical Parameters on the Spray Penetration in Two Phase Flow, Proc. ISME ,Mashhad , Iran, May ( 2003).
- [11] Khaleghi,H. and Ganji, D.D., Effect of Nonlinear k-epsilon model on the Spray in Two Phase Flow, Proc. 8<sup>th</sup> Fluid Dynamics Conference , Tabriz ,Iran, September,( 2003).
- [12] 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).

- [13] Khaleghi, H. and Hosseini, S.M. , Numerical Modeling of Spray Combustion in DI Diesel, Proceeding of the 11<sup>th</sup> Annual Conference of the CFD Society of Canada, (2003).
- [14] White, F.M. , "Viscous Fluid Flow", 2<sup>nd</sup> edn , McGraw – Hill, New York. (1991).
- [15] 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).
- [16] Reitz, R. D. and Diwakar, R., Effect of Drop Break up on Fuel Sprays, SAE Technical Paper Series ,860469, Feb. (1986).
- [17] Dukowicz, M., and Yuen, B.C., Experimental Study of Droplet Evaporation in a High – Temperature Air Stream, *ASME Journal of Heat transfer*, **105**, p. 384, May (1983).
- [18] Niklas Nordin, P.A., Complex Chemistry Modeling of Diesel Spray Combustion, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, p. 33, May (1995).