

Altin Dorri, Andonaq Lamani (Londo), Artan Hoxha

ISSN 0350-350X

GOMABN 47, 3, 351-371

Izvorni znanstveni rad/Original scientific paper

UDK. 532.528 : 621.436.038.5-225.8 : 518.5

UTJECAJ GEOMETRIJE OTVORA PRI POJAVI KAVITACIJE BRIZGALJKI DIZELOVIH MOTORA, BROJČANO ISPITIVANJE

Sažetak

Ovaj rad donosi brojčano ispitivanje koje je izvršeno radi praćenja utjecaja oblika otvora pri stvaranju mlaza kod visokotlačnih mlaznica dizelovog motora. Osobito je ispitivan utjecaj cilindrične i necilindrične geometrije otvora na karakteristike stvaranja mlaza kako bi se ustanovila veza između geometrije mlaznica i osobitosti strujanja u mlaznici. Različiti oblici (konvergentni stožasti, divergentni stožasti i cilindrični) su ispitani pomoću metode kontrolnih volumena CFD code FLUENT 5.5 pod različitim tlakovima pri ubrizgavanju goriva. Simulacija je izvođena pod tlakom između 40 MPa i 140 MPa, te uz hod igle od 50 μm . U CFD simulacijama praćene su izobare tlaka, linije toka, vektori brzine, maseni protok unutar brizgaljka. Rezultati su pokazali da se promjena tlaka unutar otvora značajno mijenja s obzirom na koničnost. Ponašanje volumenskog udjela razlikuje se kod triju brizgaljki.

1. Uvod

Razvoj motora s kompresijskim paljenjem uglavnom je povezan s povišenjem tlaka paljenja i mogućnošću ubrizgavanja iz nekoliko mlaznica tijekom jednog ciklusa ubrizgavanja. Obje prilagodbe imaju pozitivan učinak na karakteristike motora i proces stvaranja emisije plinova. Tijekom posljednjeg desetljeća kao posljedica kapilarne difuzije u visokotlačnim sustavima ubrizgavanja kod dizelovog motora s izravnim ubrizgavanjem potaknula je istraživanja na području kompleksne dinamike fluida do koje dolazi unutar brizgaljke. Posebice pojava vezana za kavitaciju unutar brizgaljke [1, 2] ima osobitu važnost budući da se odnosi na stvaranje mlaza, pojavu koja je ključna za dobivanje učinkovitog izgaranja i niske emisije NO_x i čađe. Obično se kavitaciju smatra štetnom pojavom, koja doprinosi eroziji mehaničkih dijelova, primjerice na uskim zonama gornjeg dijela brizgaljke. No unutar otvora brizgaljki ona pospješuje pulverizaciju goriva, što za posljedicu ima povećanje radnih karakteristika koje se odnose na emisije [3]. Kavitacija je usko povezana s visokim tlakom kod novih sustava ubrizgavanja (preko 100 MPa) i s geometrijom brizgaljki. Kako bi došlo do raspršivanja što više mjehurića teži se geometriji brizgaljka s više

otvora (čak do jedanaest rupica) s iznimno smanjenim promjerom (reda vrijednosti 100 μm). Smanjeni dijelovi kojima prolazi uljno gorivo, povećani tlak ubrizgavanja zajedno s povećanim kutom inklinacije uzrokuju stvaranje kavitacijskih mjehurića unutar otvora brizgaljke [4]. Kavitacija je fizička pojava do koje dolazi kada se tlak tekuće faze spusti ispod parnog tlaka. Stvaranje mjehurića pare koje prati kavitaciju može biti heterogenog ili homogenog tipa. Ukoliko nukleaciji mjehurića pogoduju mikročestice raspršene u primarnom fluidu ili hrapavost stijenki cijevi koja sadrži fluid, radi se o heterogenoj kavitaciji, u protivnom, ukoliko je u potpunosti prouzročena nekim stanjima nukleacije, radi se o homogenoj kavitaciji. Postoje brojni načini (neki su još neistraženi) na koje može doći do kavitacije unutar visokotlačnih brizgaljki.

Provedena su razna eksperimentalna i teorijska istraživanja kako bi mogli predvidjeti i kontrolirati stvaranje mlaza goriva povezanih s kavitacijom. Eksperimentalna promatranja [5, 6] svjedoče o zanimljivim razlikama u propusnosti geometrija mlaznice i jasnoj otpornosti stožaste mlaznice na kavitaciju. Hountalas i ostali [7] su proveli eksperimentalno ispitivanje korištenjem triju različitih vrsta otvora mlaznice, standardne, konvergentne i divergentne, kako bi pratio učinak stožastog oblika otvora mlaznice na performanse motora i ispuštanje plinova. U odnosu na ostale dvije vrste, kod divergentne mlaznice je zapaženo povećanje količine čađe i smanjenje NO_x .

S druge strane zbog poteškoća da se izvedu eksperimenti na otvorima brizgaljki malih veličina izvršen je niz brojčanih ispitivanja te su napravljeni brojni kavitacijski modeli. Brojčana ispitivanja [8, 9] su uglavnom usmjerena na individualizaciju prikladnog fizičkog modela što se odnosi na nukleaciju mjehurića kao i na njihov rast i propadanje. U svakom slučaju, budući da je pojava dviju faza iznimno složena zajedno s prijenosom mase između dviju faza kao i s usko povezanom turbulencijom unutar fluida, dolazi do iznimno snažnog povezivanja ovih pojava i jednadžbi koje njima upravljaju. Važan čimbenik kod pojave kavitacije je *kavitacijski broj*, koji se određuje na sljedeći način:

$$CN = \frac{P_{inj} - P_{out}}{P_{out} - P_{vap}} \quad (1)$$

jednako kao i unutarnja geometrija brizgaljke koja s obzirom na stanje dinamike fluida unutar toka određuje kako će se povećavati nakupljanje parnih mjehurića.

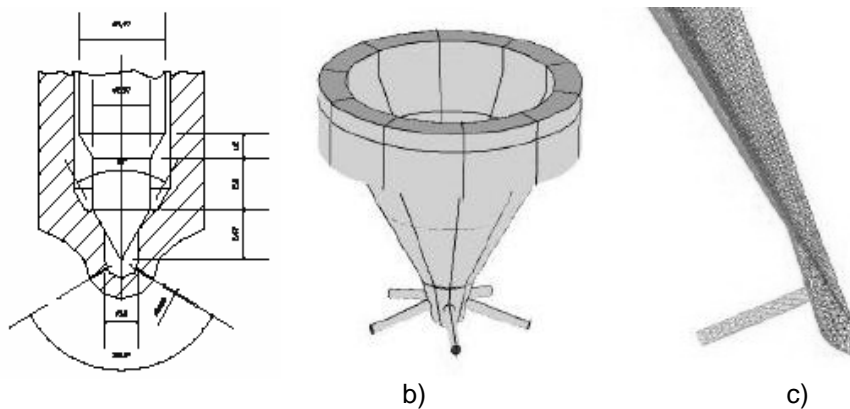
U ovom se radu prvenstveno usredotočujemo na utjecaj geometrije otvora kod pojave kavitacije. U tu su svrhu ispitivane tri vrste otvora (cilindričan, konvergentan i divergentan) korištenjem komercijalne računalne dinamike fluida CFD code *Fluent* 5.5.14 (koji je lako dostupan našem Odsjeku). Rezultati su uspoređivani s eksperimentalnim radom [5] i ostalim ranijim ispitivanjima. Ovaj rad sinteza je rada navedenog pod [10].

2. Ispitivanje brizgaljki

Jedna od osnovnih geometrijskih karakteristika otvora brizgaljke jest mijenjanje poprečnog presjeka uzduž brizgaljke, što predstavlja koničnost otvora. Kao simulacijska brizgaljka služi ona s pet otvora, kao na slici 1, s nominalnim promjerom otvora $D = 68 \mu\text{m}$. Ispitivane brizgaljke razlikuju se jedino po koničnosti otvora, izraženoj kao:

$$C = \frac{D_{in} - D_{out}}{10} \quad (2)$$

u kojem su dimenzije ulaznog promjera (D_{in}) i izlaznog promjera (D_{out}) izražene u milimetrima. Različite vrijednosti ispitivane za koeficijent koničnosti C su: $C = 0$ (cilindrični otvor), $C = +1.5$ (konvergentni stožasti otvor), $C = -1.5$ (divergentni stožasti otvor).



Slika 1: Ispitivane brizgaljke: a) Poprečni presjek brizgaljke, b) 3D prikaz područja raspršivanja, c) 3D simulacijska mreža dijela mlaznice

Na osnovi geometrijske simetrije i sličnog ponašanja pet otvora tijekom ubrizgavanja uljnog goriva, što potvrđuje studija [5], CFD studija ograničena je samo na petu mlaznicu tako da je simuliran segment kuta 72° (slika 1.c). Ovo je dovelo do smanjenja vremena trajanja i smanjenja procesora (CPU) korištenog za izračunavanje. Drugi razlog za ovo pojednostavljenje bila je ograničena sposobnost računala korištenog pri simulaciji.

3. Kavitacijski model primijenjen u Fluentu

CFD software korišten pri brojčanoj simulaciji je *Fluent* 5.5, budući da primjenjuje model koji može predvidjeti početak kavitacije fluida. Takav kavitacijski model može oblikovati ponašanje u dvije faze, tekućoj i parnoj, rješavanjem jedinstvene jednadžbe količine gibanja i jednadžbe kontinuiteta za sekundarni fluid [11].

Primijenjeni model može predvidjeti početak kavitacije, ali ne i propadanje mjehurića. Kavitacijski model oslanja se na koncept volumenskog udjela (VOF), ali se razlikuje od VOF modela s obzirom na dva značajna aspekta: i) za razliku od VOF-a (koji oblikuje dva nepomiješana fluida), ne pretpostavlja međufazu između dva nepomiješana fluida, nego dopušta da se fluidi međusobno prožimaju. Volumenski udjeli dviju faza (α_v i α_l) za kontrolni volumen mogu stoga biti jednaki bilo kojoj vrijednosti između 0 i 1, ovisno o tome koliko prostora zauzima svaka faza. ii) Kavitacijski model dopušta prijenos mase iz jedne faze u drugu. To nam omogućuje stvaranje pare iz tekućine. Postojeća primjena kavitacijskog modela pretpostavlja dvofazni homogeni model (nema preklapanja između faza). Kao i VOF model, rješava se jednom jednadžbom količine kretanja za sve faze i jednadžbom volumenskog udjela za sekundarnu fazu. Volumenski udio primarne faze bit će izračunat oduzimanjem volumenskog udjela sekundarne faze od 1.

Jednadžba kontinuiteta za parnu fazu osnova je jednadžbe volumenskog udjela:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_v u_j) = \frac{1}{\rho_v}(\dot{m}_{vl} - \frac{d\rho}{dt}) \quad (3)$$

Volumenski udio tekuće faze izračunat je na osnovi sljedećeg izraza:

$$\alpha_v + \alpha_l = 1 \quad (4)$$

Kavitacijski model primijenjen u Fluentu pretpostavlja da se radi o izotermičkoj pojavi, zanemarujući toplinske promjene i latentnu toplinu isparavanja, budući da se u tekućini pri niskim temperaturama stvaraju kavitacijski mjehurići. Prema ovoj hipotezi tlak unutar mjehurića ostaje gotovo konstantan pri takvim uvjetima, a promjenu promjera mjehurića moguće je procijeniti pomoću pojednostavljene Rayleigh jednadžbe:

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} \quad (5)$$

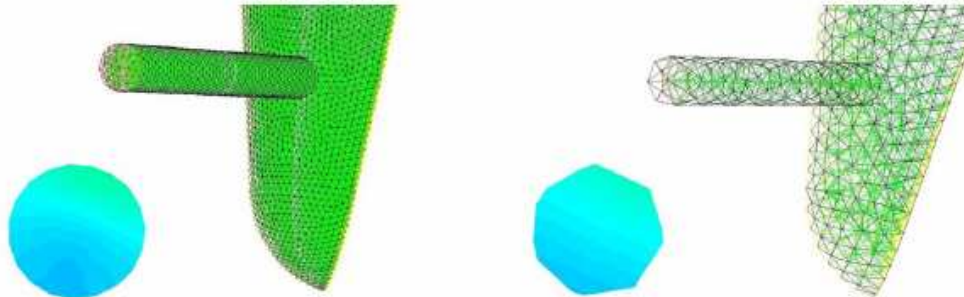
Stoga ukupnu masu parne faze možemo izračunati kao što slijedi:

$$m_v = \rho_v \frac{4}{3} \pi R^3 n \quad (6)$$

4. Rezultati CFD simulacije i rasprava

Već smo naveli da ispitivanje vršeno samo na segmentu kuta 72° . Izračuni su vršeni na dvjema različitim rešetkama (slika 2), kako bismo ispitali mogućnost osjetljivosti rešetke. Obje 3D mreže od iste vrste četverokutnih ćelija, ali različite gustoće.

Najgušću mrežu činilo je 216440 ćelija s prosječnom dimenzijom stranice od 11.3 μm , dok je manje gusta mreža bila sastavljena od 30920 ćelija s prosječnom dimenzijom stranice od 22.6 μm . Kao odlučujući parametar uspoređivan volumenski udio parne faze (slika 2). Budući da su rezultati obje mreže bili slični odlučeno je da će se koristiti manje gusta mreža.



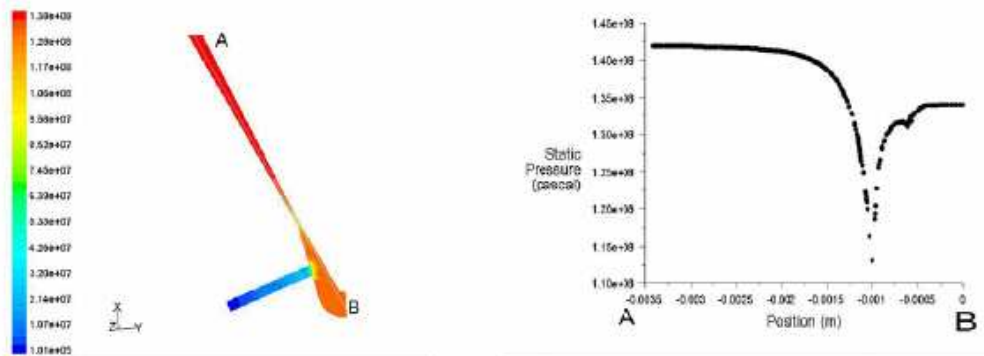
Slika 2: Osjetljivost mreže volumenskog udjela pare na središnjem poprečnom presjeku otvora

Ulaz i izlaz su oblikovani kao tlačni rubni uvjeti sa 40 MPa i 140 MPa relativnog tlaka pri ulazu i 0,1 MPa pri izlazu, dok je hod igle iznosio 50 μm . Radni fluid je mješavina tekućeg dizelskog goriva i dizelskih para. Naznačena su sva svojstva obje faze, uključujući parni tlak. Kao i kod kavitacijskog modela također je aktiviran standardni $k-\varepsilon$ model za uvjete turbulentnog strujanja. CFD simulacije su izvođene u nepostojanom režimu, kao što to zahtijeva kavitacijski model primijenjen u Fluentu, a rezultati se odnose na trajanje od $3.5 \cdot 10^{-3}$ sekundi. Simulacijama je naglašen početak kavitacije unutar otvora kod sve tri različite konfiguracije i za oba tlaka ubrizgavanja. Na slici 3 prikazana je raspodjela statičkog tlaka na središnjem dijelu ispitivane brizgaljke. Nakon prolaska kroz uski dio gdje je došlo do trenutnog pada, od 140 MPa do 110 MPa, tlak raste, ponovno se stabilizirajući unutar središnjeg dijela da bi u izlaznom otvoru ponovo došlo do pada. Dok se raspodjela tlaka unutar tijela brizgaljke slično ponaša kod svih triju ispitivanih geometrija, raspodjela tlaka unutar otvora značajno ovisi o koničnosti. Kao što se vidi na slici 4, tlak unutar cilindričnog otvora ($C = 0$) smanjuje se pri gotovo konstantnom gradijentu od ulaza do izlaznog dijela. Slika 5 prikazuje raspodjelu tlaka unutar konvergentnog stožastog otvora ($C = +1.5$), kod kojeg je očigledan pad tlaka dizelskog goriva unutar otvora, međutim, u usporedbi s cilindričnim otvorom tlak polakše pada. Kod divergentnog stožastog otvora ($C = -1.5$) dolazi do trenutnog pada tlaka od ulaza, a zatim ostaje kvazi konstantan sve do izlaza (vidi slika 6).

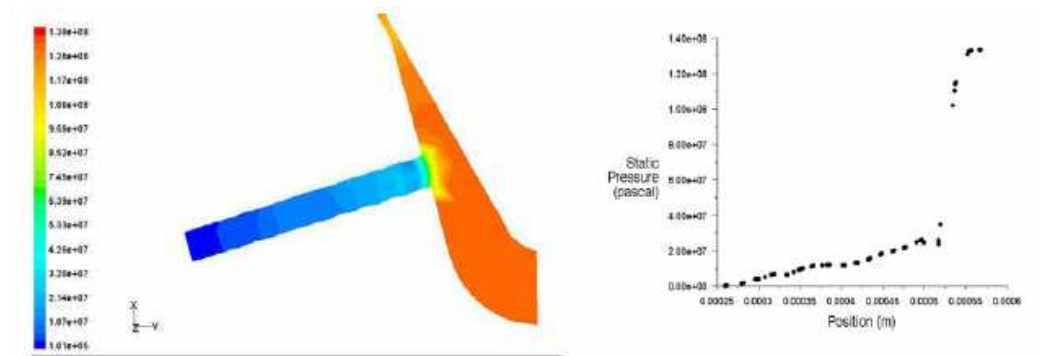
Na slikama 7, 8 i 9 su relativno predstavljene izobare volumenskog udjela dizelskih para unutar brizgaljke. Ponašanje triju vrsta brizgaljki se međusobno razlikuje. U slučaju cilindrične geometrije otvora (slika 7) kavitacija počinje ovisno o ulaznom kutu, gdje zbog trenutne promjene smjera strujanja fluida zbog blago zaobljena ulaza dolazi do razdvajanja strujanja fluida od gornje stijenke i kao posljedica

smanjenja tlaka pri ili ispod tlaka isparavanja, tako da dolazi do kavitacije i širenja prema izlazu. Ovaj tip kavitacije također je istaknut u prijašnjim radovima [1, 2, 8, 12] i blisko je povezan s ulaznim dijelom geometrije otvora koja ima presudan utjecaj na na linije strujanja dizelskog goriva. Ponašanje strujanja značajno se mijenja s obzirom na koničnost otvora.

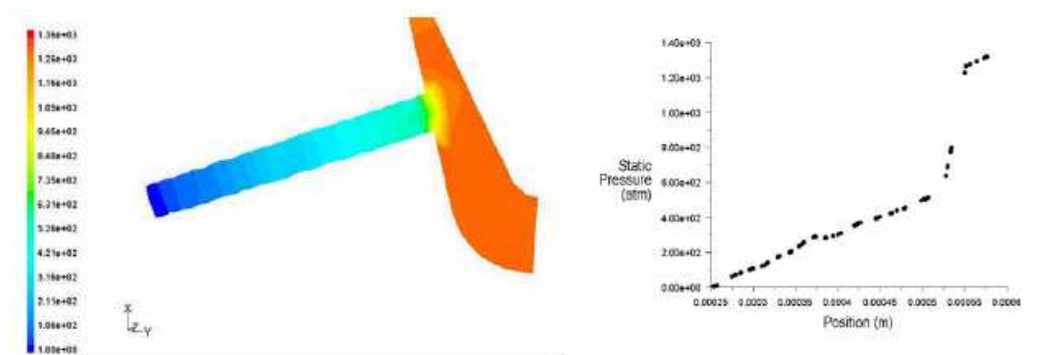
Uspoređujući slike 7, 8 i 9 vidljivo je da do kavitacije kod konvergentnog otvora (slika 8) dolazi isključivo u zoni izlaza. Naime, zbog konvergentnog otvora linije strujanja su kompaktne, a mogućnosti da dođe do razdvajanja od stijenke su smanjene na najmanju moguću mjeru. Iako je i u ovom slučaju izlazni kut prilično oštar, ne dolazi do razdvajanja strujanja fluida od gornje stijenke, a pad tlaka unutar otvora je manje naglašen. Suprotna pojava događa se kod otvora s divergentnom koničnošću (slika 9). Zapravo divergentna geometrija otvora povećava tendenciju razdvajanja linija strujanja te se stoga kavitacija pojavljuje uzduž cijelog otvora, stvarajući značajno povećanje udjela pare u usporedbi sa slučajem kod cilindričnog otvora. U svom su eksperimentalnom radu De Risi i ostali [6] primijetili da je osnovna razlika među ove tri vrste otvora u kutu mlaznice stožastog raspršivača za prvi primjer hoda igle, što govori u prilog razlikama u kavitaciji kod triju otvora i našim gore navedenim rezultatima brojčanog ispitivanja. Simulacije su izvedene u skladu s ubrizganom količinom goriva (maseni protok) iz svih triju tipologija otvora. Cilindrični otvor stvara veće strujanje u odnosu na konvergentni otvor budući da konvergentna geometrija zagušuje linije strujanja pri izlazu. Kod cilindričnog i divergentnog stožastog otvora dominantna je pojava kavitacije, a u slučaju divergentnog ona je deset puta veća nego kod cilindričnog otvora što za posljedicu ima smanjenje brzine protoka goriva na izlazu. Simulacije s $P_{inj} = 40$ MPa su dale slične rezultate u oba slučaja s obzirom na izobare tlaka unutar različitih tipologija otvora i početaka kavitacije. Pored standardnog modela $k-\varepsilon$ turbulencije pri simulacijama je također korišten Reynolds Stress Model koji je korišten pri simulacijama koje, međutim, nisu dale bitno različite rezultate od $k-\varepsilon$ modela, osim povećanja vremena izračunavanja. Isto se dogodilo kod republikacije mreže korištenjem $k-\varepsilon$ modela; rezultati su bili gotovo isti.



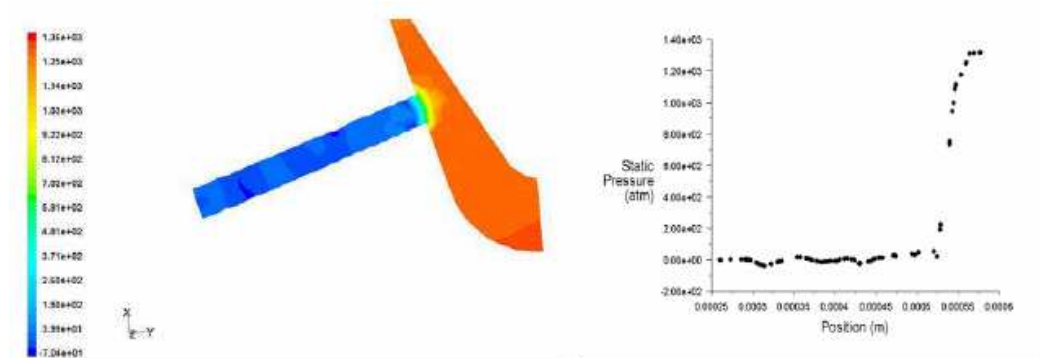
Slika 3: Izobare unutar brizgaljke



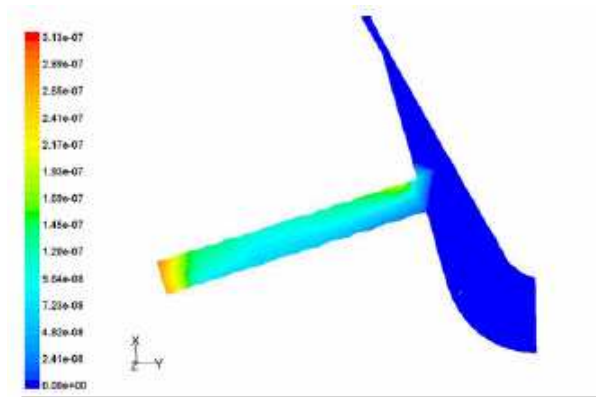
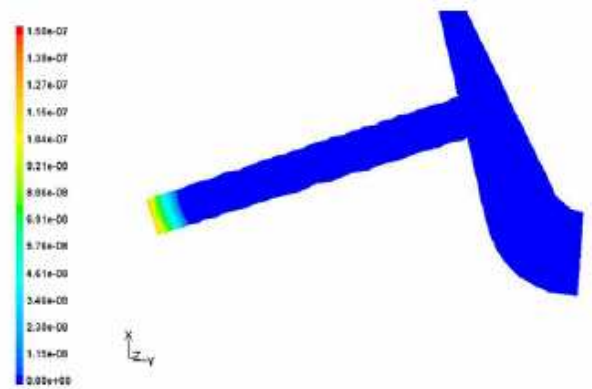
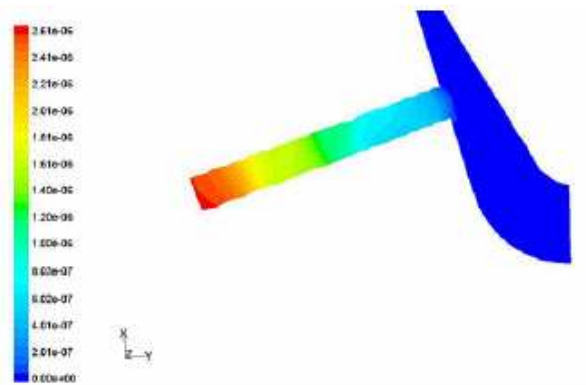
Slika 4: Izobare unutar cilindričnog otvora ($C=0$)



Slika 5: Izobare unutar kovergentnog stožastog otvora ($C=+1.5$)



Slika 6: Izobare unutar divergentnog stožastog otvora ($C=-1.5$)

Slika7: Izobare volumenskog udjela dizelskih para, unutar cilindričnog otvora ($C=0$)Slika 8: Izobare unutar konvergentnog stožastog otvora ($C=+1.5$)Slika 9: Izobare unutar divergentnog stožastog otvora ($C=-1.5$)

Zaključak

Cilj ovog rada bio je proučiti utjecaj geometrije otvora na pojavu kavitacije i isparavanje. U tu su svrhu simulirane tri mini-sac mlaznice s pet rupa koje su se razlikovale po koničnosti. Brojčana simulacije je pokazala karakteristike i razlike kavitacijskog strujanja kojeg stvaraju aksijalno simetrične mini-sac brizgaljke s pet otvora različite koničnosti, no ovo je brojčano ispitivanje bilo ograničeno alatima koji su pritom korišteni. CFD simulacije su dokazale razlike vezane za početak kavitacije kod sve tri vrste otvora, naglašavajući velike i značajne različitosti kod pojave koja uzrokuje kavitaciju za promatrane geometrije. Rezultati polja tlaka pokazuju mjesta gdje može doći do kavitacije; radi se o mjestima gdje dolazi do recirkulacije, a vrijednost tlaka je blizu tlaku pare. Kavitacijskim modelom se moglo predvidjeti početak kavitacije i razlike unutar ove pojave kod sva četiri ispitivana otvora.

Nedostatak ovog ispitivanja jest u tome da je za simulaciju razmatrana samo 1/5 vrha brizgaljke. Također je potrebno naglasiti ograničenja kavitacijskog modela korištenog uz Fluent budući da on ne dopušta početno stvaranje mjehurića pare ni simuliranje njihovog propadanja. Fluent kavitacijski model je isto tako ograničen time što u obzir ne uzima toplinske promjene, a time i promjene temperature. S vremenom bi bilo poželjno primijeniti promjenjivu rešetku kako bi se mogao simulirati početak strujanja pod stvarnim radnim uvjetima i s pokretnom iglom unutar brizgaljke, čime bi se moglo simulirati ponašanje strujanja zbog uvjeta turbulencije koju stvara pokretanje igle. Moguća simulacija sa sadašnjom verzijom Fluenta omogućuje samo karakteriziranje pojave s fiksnim hodom igle, dakle, u statičkim uvjetima, što isključuje dinamičnost stvarnih uvjeta unutar kojih brizgaljka djeluje.

Međutim, numeričko modeliranje kavitacije je ekonomična metoda procjenjivanja različitih dizajna brizgaljke zbog niza radnih uvjeta s obzirom na to da je s postojećim uređajima teško provesti pravo ispitno mjerenje.

Nomenklatura

CN	-	kavitacijski broj
P_{inj}	Pa	tlak ubrizgavanja
P_{out}	Pa	izlazni tlak
P_{vap}	Pa	tlak para
C	-	koničnost
D_{in}	mm	unutarnji promjer otvora
D_{out}	mm	vanjski promjer otvora
α_v	-	volumenski udio parne faze
α_l	-	volumenski udio tekuće faze
ρ_l	kg/m ³	gustoća tekuće faze
ρ_v	kg/m ³	gustoća parne faze
R	mm	polumjer parnih mjehurića
n	-	broj mjehurića po jedinici volumena
\dot{m}_{vl}	kg/s	prenesena masa između tekuće i parne faze

Literatura

- [1] **Arcoumanis C., Flora H., Gavaises M., Kampanis N., Horroks R.**, "Investigation of Cavitation in a Vertical Multi-Hole Injector", *SAE paper* 1999-01-0524, 1999.
- [2] **Arcoumanis C., Badami M., Flora H., Gavaises M.**, "Cavitation in Real-Size Multi-Hole Diesel Injector Nozzles", *SAE paper* 2000-01-1249, 2000.
- [3] **Arcoumanis C., Whitelaw J. H.**, "Is Cavitation Important in Diesel Engine Injectors?", Proceeding of Thiesel '2000, *Conference on Thermofluiddynamic processes in Diesel Engines*, Valencia 13-14 September 2000.
- [4] **Kato M., Kano H., Date K., Oya T., Niizuma K.**, "Flow Analysis in Nozzle Hole in Consideration of Cavitation", *SAE paper* 970052, 1997.
- [5] **De Risi A., Colangelo G., Laforgia D.**, "An Experimental Study of High Pressure Nozzles in Consideration of Hole-to-Hole Spray Abnormalities", *SAE paper* 2000-01-1250, 2000.
- [6] **Benajes J., Pastor J. V., Payri R., Plazas A. H.**, "Analysis of the Influence of Diesel Nozzle Geometry in the Injection Rate Characteristic", *Journal of Fluids Engineering* 126, pp. 63-71, 2004
- [7] **Hountalas D. T., Zannis T. C., Mavrooulos G. C., Schwarz V., Benajes J., Gonzalez C. A.**, "Use of a multi-zone combustion model to interpret the effect of injector nozzle hole geometry on HD DI diesel engine performance and pollutant emissions", *SAE paper* 2005-01-0367, 2005
- [8] **Schmidt D. P., Rutland C. J., Corradini M.**, "A Numerical Study of Cavitating Flow Through Various Nozzle Shapes",.
- [9] **Soteriou A., Andrews R., Smith M.**, "Direct Injection Diesel Sprays and the Effects of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization", *SAE paper* 950080, 1995.
- [10] **Dorri A.**, "Fuel injection system in Diesel engine and cavitation problems", Master Thesis, Polytechnic University of Tirana, Tirana 2006
- [11] **Fluent. Inc.** Fluent 5.5 User's Guide, *Fluent Inc.*, Lebanon NH, 2000.
- [12] **Qin J., Yu S. T. J., Zhang Z.C., Lai M. C.**, "Transient Cavitating Flow Simulations Inside 2-D VCO Nozzle Using the Space-Time CE/SE Method", *SAE paper* 2001-01-1983, 2001.

UDK	ključne riječi	key words
532.528	kavitacija strujanjem	flow cavitation
621.436.038.5	uređaji za ubrizgavanje goriva dizelovog motora	diesel engine fuel injection devices
621.436-225.8	sapnica za ubrizgavanje, oblikovanje i konstrukcija	injection nozzle, design and construction
518.5	računalne metode i modeliranje	computer methods and modeling

Autori

Altin DORRI, dipl. ing., e-mail: altindorri@yahoo.it; Andonaq LAMANI (LONDO), prof. dr., Artan HOXHA, dipl. ing.

Politehničko sveučilište u Tirani, Albanija

Primljeno

23.2.2009.

Prihvaćeno

25.4.2009.