تعيين سرعت بحراني درون تونل البرز حين آتش‌سوزي

بهزاد نيكنام[i] *؛ حسن مدني[ii]؛ حسين سالاري راد[iii]

چكيده

دود و گازهاي سمي خارج شده از آتش‌سوزي درون تونل، براي سلامتي كاربران تونل بسيار مضر است. بنابراين براي خروج افراد و وسائط نقليه و جلوگيري از گسترش اين مواد در بالادست محل آتش‌سوزي، تامين هواي تازه اهميت زيادي دارد. سرعت بحراني جريان هوا، مهمترين فاكتور موثر براي طراحي سامانه ايمني درون تونل و جلوگيري از گسترش دود در جلوي محل آتش سوزي در امتداد جهت جريان مي‌باشد. براي برآورد اين سرعت، تونل البرز واقع در آزادراه تهران- شمال، حين آتش‌سوزي با انرژي حرارتي آزادشده برابر۱۰۰ مگاوات به مدت۹۶۰ ثانيه به كمك يك مدل عددي سه بعدي با نرم افزارFDS شبيه سازي شده است. مدل سه بعدي تونل به طول ۵۰۰ متر، و روند آتش سوزي بر اساس آهنگ گرماي آزاد شده متناسب با زمان احتراق هپتان شبيه سازي شده است . شبيه سازي جريان مغشوش واحتراق به ترتيب براساس معادلات لس(LES) و معادلات شكست ادي(EDDY) . مدل سه بعدي با شبكه بندي متشكل از سلول هاي مربعي با اندازه ۵۰ سانتي متر انجام شد .در اين تحقيق نتايج شبيه سازي، باروابط تجربي مقايسه شدند . بر اساس نتايج مدل عددي براي آتش سوزي با اندازه ۱۰۰مگاوات، سرعت بحراني۳/۵متر در ثانيه پيش بيني شده كه همخواني مناسبي با رابطه ارائه شده توسط اوكا و اتكينسون دارد و به عنوان سرعت بحراني براي كنترل دود در بالادست آتش سوزي با اندازه ۱۰۰ مگاوات پيشنهاد مي‌شود.

كلمات كليدي:سرعت‌بحراني، آتش‌سوزي، شبيه‌سازي‌عددي، نرم‌افزارFDS، تونل‌البرز

Determining Critical Wind Velocity During Fire Accident in Alborz Tunnel

B. Niknam, H. madani and S. Salarirad

ABSTRACT

Smoke and toxic gases created by fire accidents in tunnel are very harmful for tunnel users health and safety .So fresh air supply for fire smoke control in the fire upstream, is important .Thus, the critical velocity is a most important factor for this .In order to determine the critical velocity during fire in the Alborz tunnel 3dimensional model of the tunnel and fire was created by FDS software .Fire with 100 mw size for 960second in model with 500m length was simulated. Fire and Smoke was modeled by HRR and heptanes' combustions. Unsteady flow and combustions was simulated by LES and Eddy break up model. Model was meshed by 50 cm cell. Finally, simulation result was validated by experimental equation .simulation predicted value for critical velocity is 3.5 m/s which have good agreement with Oka and Atkinson experimental equation so we propose 3.5 m/s as critical velocity for fire with 100 mw in Alborz Tunnel .

KEYWORDS **:** Critical Velocity, Fire, Numerical Simulation, FDS Software, Alborz Tunnel

---

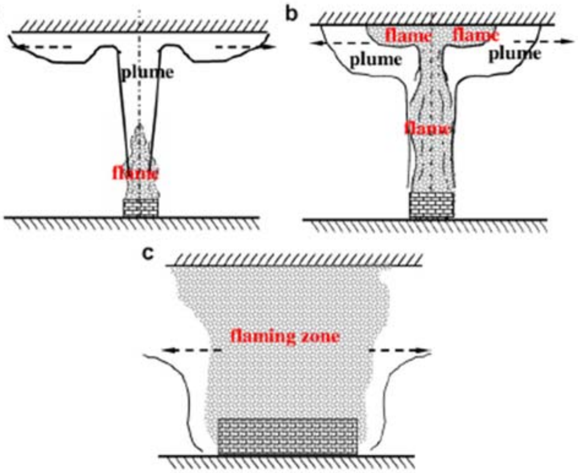
تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۸/۱۰/۲۷
تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۱۲

[i] * نويسنده مسئول و دانشجوي دكتري استخراج معدن،دانشكده مهندسي معدن و متالورژي دانشگاه صنعتي امير كبير ؛ behzadniknam@aut.ac.ir
[ii] استاديار، دانشكده معدن و متالورژي دانشگاه صنعتي امير كبير؛hmadani@aut.ac.ir
[iii] استاديار، دانشكده معدن و متالورژي دانشگاه صنعتي امير كبير؛salarih@aut.ac.ir

۱- مقدمه

تونل‌هاي مونت بلان بين فرانسه و ايتاليا ،تونل تارن در اتريش،تونل گوتارد در سوييس،تونل داگو در كره و تونل فري جوس مابين ايتاليا و فرانسه،تونل‌هاي جاده‌اي هستندكه‌در سال‌هاي اخير آتش‌سوزي هاي بسيار بزرگ در آنها اتفاق افتاده است بنابراين،ايمني درون تونل‌هاي جاده‌اي در سال هاي اخير بيشترموردتوجه قرارگرفته‌است [۲].

باتوجه به شكل (۱) سه حالت مختلف براي آتش‌سوزي درون تونل وجود دارد.در حالت a ،مانند آتش‌سوزي سواري كوچك، شعله آتش‌به سقف تونل نمي‌رسد.درحالت b، مانند آتش‌سوزي متوسط مقياس اتوبوس،شعله آتش به سقف تونل رسيده و در زير آن به صورت‌افقي حركت مي‌نمايد.درحالت C،مانند آتش‌سوزي كاميون‌هاي سنگين،آتش سوزي به اندازه‌اي بزرگ است كه علاوه بر اينكه به سقف تونل برخورد نموده،كل فضاي تونل را نيز در ناحيه آتش‌سوزي در بر مي‌گيرد [۳].



شكل۱: حالت‌هاي مختلف آتش‌سوزي درون تونل a- آتش‌سوزي مقياس كوچك b-آتش‌سوزي متوسط C-آتش سوزي بزرگ مقياس[۳]

درتونل‌هاي طويل جاده‌اي‌ازسامانه‌تهويه طولي استفاده مي‌شود و در حين آتش‌سوزي، بادبزن‌هاي قوي براي راندن دود به يك سمت تونل به كار مي‌روند. اين روش براي آتش‌سوزي‌هاي كوچك مفيداست،امااگر سرعت جريان طولي هوا كم باشد درآن صورت،دود در خلاف جهت جريان هوا حركت نموده كه اين پديده‌عقب‌زدگي لايه دود نام دارد. درتونل‌هاي شيب‌دار كه به دليل اختلاف دما،جريان تهويه طبيعي برقراراست،اين پديده بيشتر روي مي‌دهد [۳].

براي انجام عمليات نجات،سرعت طولي جريان هوا بايد بيشتر از سرعت بحراني ،كه براي جلوگيري از عقب‌زدگي دودتعيين شده است، باشد.براي محاسبه سرعت‌بحراني روابطي توسط هسلدن،كندي و پيارك ارايه شد[۴] سرعت‌بحراني در محدوده خاصي از گرماي آزاد شده، با توان يك سوم آهنگ گرماي آزاد شده رابطه دارد. در مقادير بالاتر به تدريج ارتباط بين سرعت‌بحراني و گرماي آزاد شده از رفته و سرعت‌بحراني مستقل از گرماي آزاد شده است در اين حالت سرعت فوق بحراني تعريف مي‌شود[۵].

زماني كه نيروهاي نامتعادل‌كننده با نيروي شناوري شعله آتش در محل برخورد با سقف به تعادل برسند، از عقب‌زدگي لايه دودجلوگيري‌خواهدشد.باافزايش‌آتش‌سوزي ، دماي شعله و نيروهاي شناوري افزايش مي‌يابد. براي حالت a، با افزايش آهنگ گرماي آزاد شده، سرعت بحراني تا زماني كه شعله آتش به سقف برخورد ننموده و به صورت افقي در زير آن قرار نگرفته است، افزايش مي‌يابد. در اين حالت، شرايط فوق بحراني سرعت رخ مي‌دهد كه در آن دماي شعله آتش و نيروهاي شناوري وابستگي كمتري با آهنگ گرماي آزاد شده دارند[۶].

براي مطالعه رفتار آتش‌سوزي و گسترش دود درون تونل سه روش وجود دارد. انجام آزمايش آتش سوزي در مقياس آزمايشگاهي، انجام آزمايش آتش‌سوزي در مقياس واقعي و شبيه‌سازي عددي.در روش اول، نمونه آزمايشگاهي‌از تونل مورد نظر ساخته مي‌شود.براي مثال مي‌توان به كارهاي‌اوكا واتكينسون[۷]وسايتو[۸]اشاره‌نمود.داده‌هاي حاصل از اين آزمايش‌ها فقط براي محدود پاييني از دما قابل قبول است و نتايج حاصل از اين آزمايش‌ها رانمي‌توان براي شرايط مختلف تعميم داد.روش دوم، پر هزينه بوده و فقط پژوهش فري جوس در نروژ[۹] و تونل تاريخي در آمريكادر اين موضوع انجام شده‌اند[۱۰].هدايت آزمايش‌هاي بزرگ مقياس به دليل امكانات وسيع به‌كار رفته در آن‌ها؛ براي رسيدن به جواب قابل قبول بسيار مشكل است در نتيجه هزينه مالي و زماني پژوهش افزايش خواهد يافت. روش سوم(شبيه‌سازي‌عددي) در سال‌هاي اخير گسترش يافته است. دراين روش با استفاده‌از كدهاي ديناميك‌سيالات‌محاسباتي، رفتار و چگونگي رشد آتش‌سوزي درون تونل بررسي مي‌شود كه از جمله اين تحقيقات مي‌توان به كارهاي چو [۱۱],چو وجوجو [۱۲]و هو[۱۳] اشاره كرد . هرچند اين روش از نظر هزينه و زمان اقتصادي است اما براي رسيدن به يک جواب قابل قبول، داده‌هاي حاصل از اين روش بايد با داده‌هاي حاصل از آزمايش‌هاي تجربي يا روابط‌تجربي اعتبارسنجي شود.در اين مقاله, طرح سه‌بعدي آتش‌سوزي سطحي درون تونل البرز بااستفاده از كد ديناميک سيالات محاسباتي ساخته شد و نتايج حاصل از مدل‌سازي به وسيله

روابط تجربي اعتبارسنجي شد.

۲- تونل‌البرز

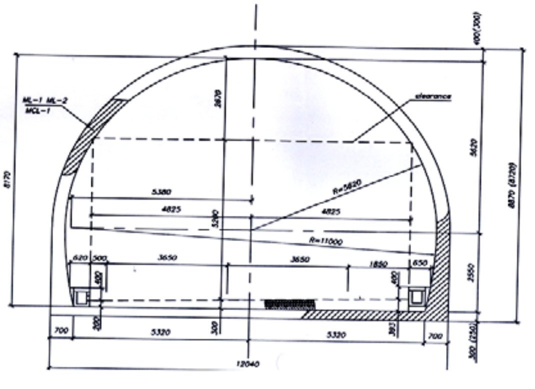
تونل‌هاي دوقلوي‌البرز، هر یک به طول تقریبي ٦٥٠٠ متر در آزاد راه تهران_ شمال، از شمال گچسر شروع مي‌شوند و تا پل زنگوله در جاده کرج- چالوس ادامه مي‌یابند و ارتفاعات البرز مرکزي با پیچیدگي‌هاي خاص زمین‌شناسي را قطع مي‌نمایند.بین دو تونل‌البرز، تونل سرویس و تهویه جانمایي شده‌است. فاصله بین دو رشته تونل‌اصلي ٤تا ٨٠متر و تونل سرویس وتهویه میان آنها قرار گرفته‌است .عرض هر يك از تونل‌ها ١٢ متر،ارتفاعشان ٨ متر و سطع مقطع آنها ٩٥ متر مربع است. سطح تراز دهانه شمالي در ارتفاع ٢٣٧٠ متر و سطح تراز دهانه جنوبي در ارتفاع ٢٤٤٠ متري قرار دارد (شکل ٢) [١].

۳- تئوري مسئله

۳-۱- سرعت بحراني

زماني که جریان تهویه طولي در تونل وجود دارد،در شرایط خاصي از جریان هوا و گرماي آزاد شده، گازهاي حاصل از آتش ممکن است در خلاف جهت جریان تهویه حرکت کنند. این پدید عقب‌زدگي نامیده مي‌شود و براي سلامتي کاربران ناحیه بالادست آتش بسیار مهم‌است .

اوکاواتکیسون [٦] با استفاده از روش‌هاي عددي و فیزیکي نشان دادند که در مورد آتش‌هاي بزرگ مقیاس، سرعت بحراني را مي‌توان به صورت مستقل از گرماي آزاد شده در نظر گرفت و رابطه اي با استفاده از گرماي آزاد شده و سرعت بحراني بي بعد به دست آورد:



شکل۲:مقطع تونل البرز [١]

$$u^*_{cr}=\frac{u_{cr}}{\sqrt{gH_t}} \qquad (۱)$$

که درآن:

u^*_{cr}: سرعت بحراني بي‌بعد

u_{cr}: سرعت‌بحراني (متردرثانیه)

H_t: قطر هیدرولیکي تونل(متر)

سرعت‌بحراني با استفاده از دو عبارت مختلف زیر بیان مي‌شود:

$$u^*_{cr}=۰/۳۵(۰/۱۲۴)^{-۱/۳}(Q^{''})^{۱/۳} \qquad Q^{''}<۰/۱۲۴ \qquad (۲)$$

$$u^*_{cr}=۰/۳۵ \qquad Q^{''}>۰/۱۲۴ \qquad (۳)$$

دررابطه(۲و۳) $Q^{''}$ گرماي آزادشده بي‌بعد است که از رابطه (٤) به دست مي‌آید :

$$Q^{''}=\frac{Q}{\rho.c_pT.\sqrt{g}\left(D\right)^{۵}} \qquad (٤)$$

که درآن:

D: قطر هیدرولیکي آتش (متر)

که از رابطه (٥) به دست مي‌آید:

$$D=\left(\frac{Q}{\rho.c_pT.\sqrt{g}}\right)^{\frac{۲}{۵}} \qquad (٥)$$

Q: آهنگ گرماي آزاد شده(وات)

ρ_0 : چگالي هوا(کیلوگرم برمتر مکعب)

C_p:گرماي ویژه ترکیب

T_0: دماي هواي محیط (کلوین).

۳-۲- منحني هیدروکربن

احتراق سریع و پتانسیل بالاي مواد هیدروکربني، در این منحني به صورت افزایش سریع دماي آتش‌سوزي نمایان شده است[۱۴].

$$T\left[C^{\circ}\right]=۲۰+۱۰۸۰\left(۱-۰.۳۲۵.e^{-۰.۱۶۷t}-۰.۶۷۵.e^{-۲.۵t}\right) \qquad (۶)$$

۳-۳- منحني هیدروکربن اصلاح شده

در استاندارد فرانسه، منحني دیگري ارایه شده که درآن دماي آتش به مقداربیشینه ۱۳۰۰ درجه سانتي‌گراد مي‌رسد . فرمول‌بندي این منحني در رابطه(۷) آمده‌است[١٤] .

$$T\left[C^{\circ}\right]=۲۰+۱۲۸۰\left(۱-۰.۳۲۵.e^{-۰.۱۶۷t}-۰.۶۷۵.e^{-۲.۵t}\right) \qquad (۷)$$

منحني‌هاي هیدروکربن و هیدروکربن اصلاح شده در صنایع نفت و گاز و عمران توسعه یافته‌اند اما به دلیل وجود مقادیر بسیار زیاد بنزین و ترکیبات هیدروکربني در آتش‌سوزي‌هاي درون تونل،از این منحني‌ها مي‌توان براي آتش‌سوزي درون تونل استفاده‌نمود. در شکل (۳) منحني‌هاي گفته‌شده ارایه شده‌اند[١٤].

۴-۳- تغییرات دما در امتداد محور تونل

الپارت، رابطه (۸) را براي محاسبه بیشینه دماي دود در زیر سقف تونل حین آتش‌سوزي با اندازه ۶۶۸ کیلووات تا ۹۸ مگاوات درون تونل با ارتفاع ۴/۶ تا ۱۵/۵ متر ارایه داد[۱۴]:

(۸)
$$T_{\max} = T_{۰} + \frac{۵/۳۸\left(\frac{Q}{r}\right)^{\frac{۲}{۳}}}{H_f}$$

که در آن:

Q:آهنگ گرماي آزاد شده از آتش (کیلو وات)

r : فاصله از محل آتش‌سوزي (متر)

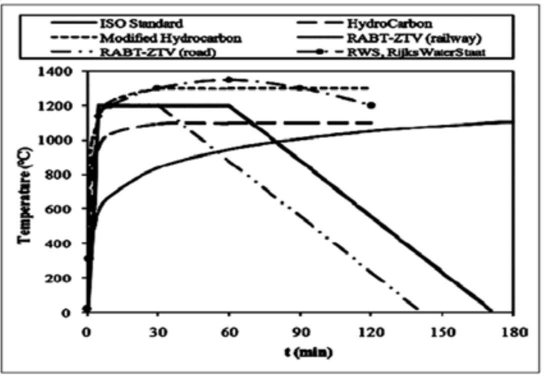
H_f:ارتفاع سقف بالاي آتش‌سوزي (متر)

$T_{\max}$: حداکثر دماي لایه دود (سانتي گراد)

T_0: دماي هواي محیط (سانتي گراد)

۴- معادلات حاکم بر جریان سیال

براي طراحي جریان مغشوش از طرحLES استفاده شد .طرح LES، معادلات ناحیه جریان کامل $\varphi(x,t)$،اجزاي گسسته $\varphi^{'}(x,t)$ و معادلات در مقیاس ریز شبکه $\varphi''(x,t)$ را به هم ارتباط مي‌دهد.استفاده از طرحLES براي معادلات پیوستگي جرم، ممنتم ،انرژي ذرات و جداسازي عوامل وابسته (u,v,w,p,x) به اجزاي گسسته و ریز شبکه ،معادلات (۹)را به دست مي‌دهد[۱۵].



شکل۳:منحني‌هاي هیدروکربن و هیدروکربن اصلاح شده[۱٤].

(۹)
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p\overline{u_j}}{\partial x_j} = ۰$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho.\overline{v_i}.\overline{u_j}\right)}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} - \rho g_i = \bar{v}.\bar{\tau}_{ij,st}$$

با طرح اسکاگروفسکي ناحیه گسسته $\varphi^{'}(x,t)$ شبیه‌سازي مي‌شود و ارتباط بین تانسور تنش رینولدز $\bar{\tau}_{ij,sG_s}$ با آهنگ کرنش بزرگ مقیاس محلي از روابط(۱۰)و(۱۱)به دست مي‌آید[۱۵]:

(۱۰)
$$\bar{\tau}_{ij,sG_s} = ۲\mu_t.\bar{S}_{ij}$$

(۱۱)
$$\bar{S}_{ij} = \frac{۱}{۲}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)$$

ضریب گرانروي دینامیکي گردابه‌ها با آنالیز اسکاگروفسکي به صورت رابطه (۱۲)طراحي مي‌شود[۱۵] .

(۱۲)
$$\mu_t = C_s^{۲}\rho\Delta^{۲}\left|\overline{S_{ij}}\right|$$

که درآن:

$\left|S_{ij}\right|$: بزرگي تانسورآهنگ کرنش بزرگ مقیاس محلي S_{ij} است

$\Delta = \left(\Delta x, \Delta y, \Delta z\right)^{1/3}$: پهناي باند فیلتر

G_s: ثابت تجربي که مقدار استاندارد آن ۰/۲۱است.

با فرض گرانروي گردابه‌ها، شار گرمایي جریان مغشوش ،معادلات انرژي را به صورت رابطه (۱۳) به دست مي‌دهد [۱۵].

(۱۳)
$$\frac{\partial \rho \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho \overline{u_i}\,\bar{h}\right)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\rho r_t}.\frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j}\right) = q_C^{'''} - \nabla.q_r$$

که در آن؛

ρr_t :عدد پراندتل جریان مغشوش که برابر با ۰/۵

$q_C^{'''}$ و $-\nabla$: گرماي آزادشده به ازاي واحد سطح و شار تابشي انرژي

طرح احتراق بر پایه واکنش شیمیایي سوخت هیدروکربني با فرایند دومرحله‌اي‌است که در آن هیدروکربن C_xH_y،به CO و H_2O اکسیده شده و پس از آن CO حد واسط به CO_2 تبدیل مي‌شود[١٦]:

(١٤)
$$۱Kg - C_xH_y + v_{۱}^{*}kg - O_{۲} \rightarrow$$
$$\left(۲\mu_{۱۲}\right) f_C kg - CO + \left(\mu_{۱۲}\right)\left(۱ - f_C\right) kg - H_{۲}O$$

(۱۵)
$$۱Kg - CO + v_{۲}Kg - O_{۲} \rightarrow \left(۱ + v_{۲}\right) Kg - CO_{۲}$$

در این شرایط، v_1^* و v_2 نشان‌دهنده ضرایب استوکیومتري است که از رابطه (١٦) به دست مي‌آید:

(١٦)
$$v_{۱}^{*} = v_{۱} - \frac{۲۸}{۱۲} f_C v_{۲}, v_{۱} = \frac{۳۲}{۱۲} f_C + \frac{۱۶}{۲}\left(۱ - f_C\right),$$
$$v_{۲} = \frac{۱۶}{۲۸}$$

که در آن:

f_C :ترکیب هیدروکربني C_xH_y براي کسر جرمي Y_i تنش ذرات اصلي واکنش $,CO,CO_2,H_2O\ \ i = C_xH_y,O_2,$ ، فرآیند احتراق با معادلات انتقال شبیه معادله ۱۳ بیان مي‌شود .

دربیشترآتش‌سوزي‌ها، تعیین واکنش شیمیایي آهنگ گرماي

آزاد شده نسبت به تعيين گرماي آزاد شده از راه مشخصات تركيب مغشوش سريع‌تر است هر چند كه براي نرم‌افزارهاي محاسباتي، تشخيص ناحيه تحت كنترل تركيب مانند دوده و CO بسيار مشكل‌است. فرآيند احتراق با استفاده از طرح شكست ادي شبيه‌سازي مي‌شود در اين روش آهنگ واكنش $\dot{w}_{C_X H_Y}$ و $\dot{W}_{CO}$ از رابطه (۱۷)و(۱۸) به دست مي‌آيد[۱٦].

$$\dot{w}_{C_X H_Y} = \frac{d_\rho Y_{C_X H_Y}}{dt} - \rho \tau_{mix} \min\left(Y_{C_X H_Y}, \frac{Y_{O_۲}}{v_۱^*} \right) \quad (۱۷)$$

$$\dot{w}_{Co} = \frac{d_\rho Y_{co}}{dt} - \rho \tau_{mix} \min\left(Y_{co}, \frac{Y_{o_۲}}{v_۲} \right) \quad (۱۸)$$

زوال جريان مغشوش و انتقال ممنتم اوليه با گردابه‌هاي انرژي بزرگ مقياس و بردار زماني τ_{mix} به صورت رابطه(۱۹) ارتباط دارد [۱٦].

$$\tau_{mix} \cong C_{EBu} . \frac{\varepsilon}{k} \quad (۱۹)$$

كه در آن C_{EBu} ثابت تجربي در طرح شكست ادي و برابر با ٤ است . با استفاده از گرانروي گردابـه μ_t و طـول مقيـاس Δ در مقيـاس گسـسته،انرژي جنبـشي توربـولانس k و آهنـگ زوال انرژي جنبشي ε از معادله (۲۰) به دست مي‌آيد[۱٦]:

$$k = \left(\frac{\mu_t}{C_\mu \rho \Delta} \right)^۲, \varepsilon = C_\varepsilon \frac{k}{۲\Delta} \quad (۲۰)$$

كه درآن : C_ε و C_μ، ثوابت چرخـشي برابـر بـا ۰/۸٥٦ و۰/۸٤٥ (واحد) مي‌باشند. آهنگ اكسيژن مورد نياز برابر با $\dot{w}_{O_2}$ و آهنگ توليد مونواكسيد كربن S_{CO} در حالتي كـه دو نـوع سـوخت در حال احتراق باشد از رابطه(۲۱) به‌دست مي‌آيد[۱٦].

$$S_{CO} = \dot{w}_{CO} - \frac{۲۸}{۱۲} f_C \dot{w}_{C_x H_y} \quad (۲۱)$$

$$\dot{w}_{O_۲} = v_۱^* \dot{w}_{C_x H_y} + v_۲ \dot{w}_{CO}$$

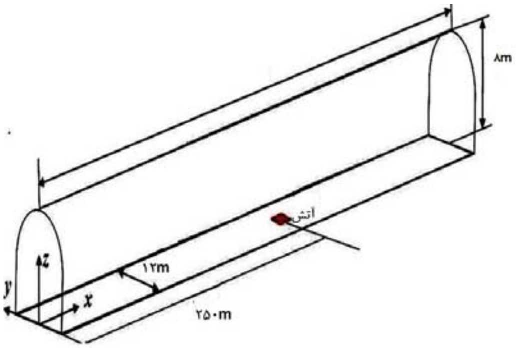
آهنگ گرماي توليد شده ارتباط مستقيمي باآهنگ اكسيژن مصرفي به صورت رابطه(۲۲) دارد [۱٦]:

$$\dot{q}_c''' = -H_{۰} \dot{w}_{O_۲} \quad (۲۲)$$

كه درآن؛ H_0 انرژي آزادشـده بـه‌ازاي واحـد جـرم‌اكـسيژن كـه با $\frac{kg}{kg}$ ۰/۰۱۳ برابراست.

۵- طراحي عددي

در اين مقاله، نتايج يك آتش‌سوزي فرضي در تونل البرز واقع در آزادراه تهران _شمال، به كمك نرم افزار عدديFDS بررسي شده است. طرح ساخته شده۵۰۰ متر طول ، ۱۲متر پهنا و ۸ متر ارتفاع داردو براي ساخت هندسه آن از روش چند بلوك استفاده شد.در شكل(٤) هندسه اين طرح ارايه شده است:



شكل٤:هندسه و ابعاد طرح ساخته شده

در طرح مذكور، براي محاسبه تنسورهاي تنش گرانرو، از معادلات جريان مغشوش طرح LESاستفاده‌شد.انتخاب دقيق اندازه سلول براي شبكه بندي طرح ،تاثير بسيار زيادي در دقت نتايج حاصل از اين مدل خواهد داشت .براي تعيين دقيق اندازه سلول در مدل سازي عددي از طول مشخصه آتش كه از رابطه (۲۳) به دست مي‌آيد استفاده مي‌شود[۱۷].

$$D^* = \left[\frac{Q}{\rho . C_p . T . \sqrt{g}} \right]^{\frac{۲}{۵}} \quad (۲۳)$$

كه در آن؛

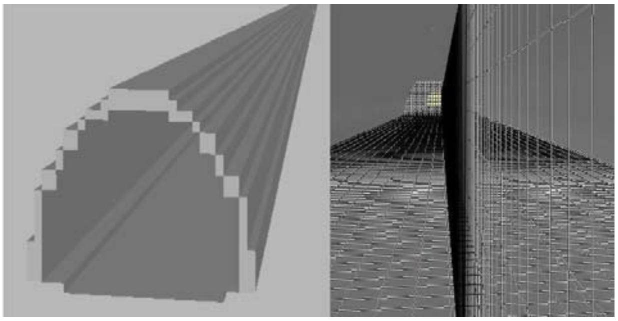
D^*: طول مشخصه آتش (متر)

Q: آهنگ گرماي آزادشده از آتش (وات)

C_p: ظرفيت گرماي ويژه هواي محيط

T و ρ: دما و چگالي هواي اطراف

اگر اندازه سلول $۰/۱D^*$باشد[۱۷] در آن صورت طرح LES نيمرخ سرعت و دما را با دقت بالايي ارايه مي‌دهد .براي آتش‌سوزي با اندازه ۱۰۰ مگاوات $۵/۸D^*$متر به دست آمد $۰/۱D^*$ با ۵۰ سانتي‌متر برابر است كه از آن براي شبكه‌بندي طرح استفاده شد .



شكل۵: شبكه بندي طرح ساخته شده

هپتان به‌عنوان منبع سوخت آتش انتخاب شد که به‌ازاي واحد جرم خود ۰/۰۱ مونواکسید کربن و۰/۰۳۷ دوده در فضاي محاسباتي توليد مي‌نمايد.آتش به صورت وابسته با زمان طراحي شد که در زمان ۳۰۰ ثانيه از اندازه ۰ به ۱۰۰ مگاوات با ضريب رشد سريع توسعه مي‌يابد در شکل (٦)آهنگ گرماي آزادشده و تابشي ارايه شده است.

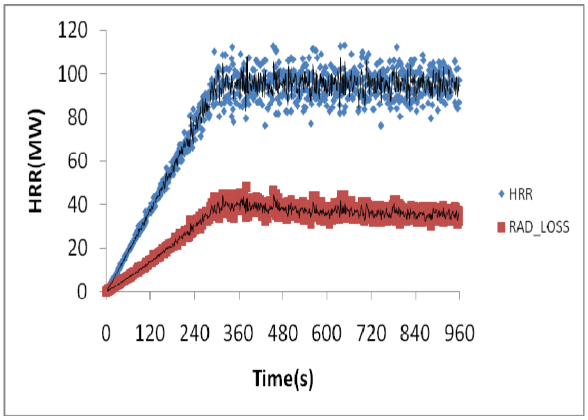
٦- نتايج حاصل از شبيه‌سازي

۶-۱- آهنگ گرماي آزادشده

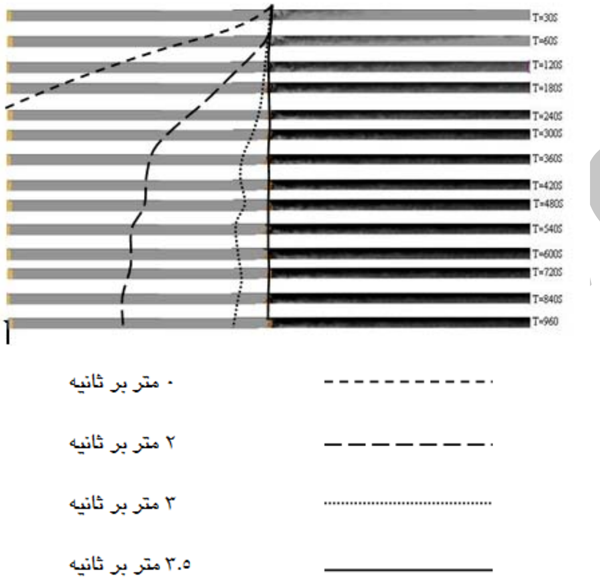
در شکل(٦) آهنگ گرماي آزادشده از آتش با اندازه ۱۰۰ مگاوات درون تونل البرز ارايه‌شده‌است.باتوجه به شکل(٦)،۳۰۰ ثانيه پس از شروع آتش سوزي،اندازه آتش از مقدار ۰ به ۱۰۰ مگاوات مي‌رسد و در اين مقدار ثابت باقي مي‌ماند. همچنين تابش از آتش نيز پس از ۳۰۰ ثانيه به مقدار بيشينه۳۰ تا ٤٠ مگاوات مي‌رسد بنابراين بيش‌ترين تابش حاصل از آتش سوزي ۱۰۰ مگاواتي درون تونل البرز ۳۰ تا٤٠ درصد اندازه آتش‌سوزي است که اين امر با نتايج حاصل از آزمايش‌هاي بزرگ مقياس برجاهم خواني دارد[۱۴].

۶-۲- گسترش دود درون تونل

در شکل(۷)عقب زدگي دود در امتداد محور تونل نسبت به زمان در سرعت جريان ۳/۵ متر در ثانيه ارايه و مرز عقب‌زدگي در ساير سرعت‌ها بروي آن مشخص شد. حين آتش‌سوزي درون تونل، دود حاصل از آتش به سقف تونل برخورد نموده و در اثر نيروي شناوري گاز گرم در بالا و پائين‌دست محل آتش‌سوزي در زير سقف و در امتداد محور تونل گسترش مي‌يابدتا اينکه به‌دليل اختلاط دود با هواي سرد اطراف و انتقال حرارت بين لايه دود و سقف بتدريج دماي دود کاهش مي‌يابد و از اين پس گسترش دود در بالادست محل آتش‌سوزي به کندي انجام مي‌شود.زماني که نيروي شناوري گاز گرم و جريان هواي مخالف در بالادست محل آتش‌سوزي برابر شد، گسترش دود در بالا دست محل آتش‌سوزي متوقف شده در اين زمان اختلاف فشار استاتيکي دود پيش‌رونده با فشار ديناميکي جريان هواي تونل برابر است[۱۸].در سرعت جريان صفر ، به دليل نبود جريان مخالف در برابر حرکت دود درون تونل، آهنگ زوال نيروي شناوري دود به کندي انجام مي‌شود و دود مسافت بيشتري را در بالا دست محل آتش‌سوزي طي مي‌کند اماباافزايش سرعت جريان درون تونل(سرعت ۲ و ۳ متر در ثانيه) ، به دليل اختلاط گاز گرم و سرد دماي لايه دود، نيروي شناوري و فاصله عقب‌زدگي دود کاهش مي‌يابد تا اينکه در سرعت جريان ۳/۵ متر در ثانيه،فشار ديناميکي جريان هواي درون تونل با فشار استاتيکي دود برابرشود. در اين حالت عقب‌زدگي دود به طور کامل کنترل مي‌شود(سرعت ۳/۵ متر در ثانيه).



شکل٦: آهنگ گرماي آزادشده از آتش‌سوزي با اندازه ۱۰۰ مگاوات درون تونل‌البرز



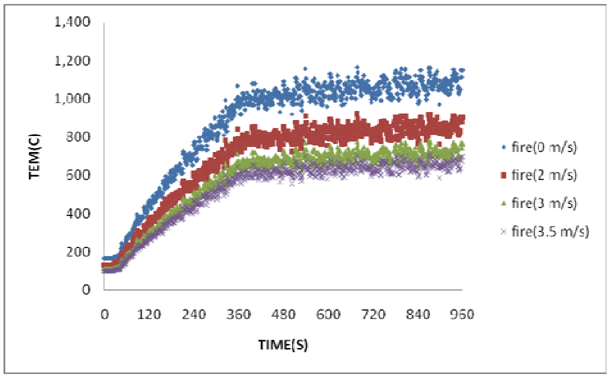
شکل ۷- گسترش دود درون تونل البرز نسبت به زمان در سرعت جريان هاي مختلف

در شکل‌هاي(۸) تا (۱۴)، رشد دماي دود در زير سقف تونل،در فواصل مختلف از محل آتش‌سوزي و در سرعت جريان‌هاي طراحي نسبت به زمان باهم مقايسه شده‌است.در محل آتش‌سوزي بيشترين دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان صفر روي مي‌دهد و در عرض ۳۰۰ ثانيه به بيش

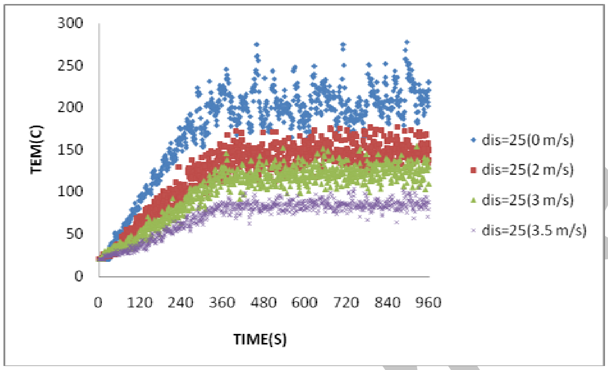
از ۱۰۰۰ درجه سانتي‌گراد مي‌رسد. با افزايش سرعت جريان درون تونل به دليل افزايش اختلاط و انتقال حرارت بين گاز گرم با هواي سرد اطراف، دماي لايه دود كاهش مي‌يابد تا اينكه در سرعت جريان ۳/۵ متر در ثانيه،دماي لايه دود در محل آتش‌سوزي بين ۶۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتي‌گراد قرار مي‌گيرد(شكل۸). باافزايش فاصله از محل آتش‌سوزي و سرعت جريان درون تونل،اختلاط گازگرم با هواي سرد اطراف افزايش يافته و انرژي رسيده از منبع گرما به لايه دود كاهش مي‌يابد ازاين رو دماي لايه دود كم مي‌شود[۱۸]. اينگاسون و همكاران دماي دود زير سقف تونل را با توجه به اندازه سرعت تهويه به دو ناحيه تقسيم نمودند اگر سرعت تهويه بي‌بعد(نسبت سرعت جريان به قطر هيدروليكي تونل)كمتر از ۰/۱۹ باشد (براي تونل البرز سرعت جريان كمتر از ۱/۸متر در ثانيه) دماي بيشينه دود مستقل از سرعت جريان هوا درون تونل است و با دماي گاز حاصل از آتش‌سوزي در فضاي آزاد به طور تقريبي برابر بوده‌اما در صورتي كه سرعت تهويه بي‌بعد بيش از ۰/۱۹ باشد با افزايش سرعت جريان درون تونل، بيشينه دماي دود در زير سقف تونل كاهش مي‌يابد[۱۹]. با توجه به موارد يادشده، دماي لايه دود در سرعت جريان صفر،مستقل از سرعت جريان است اما باافزايش فاصله از محل آتش‌سوزي، دماي دود به دليل دوري از منبع گرما به تدريج كاهش يافته تا اين كه در فاصله ۲۰۰ متري به بيشينه دماي ۸۰ درجه سانتي‌گراد مي‌رسد.با افزايش سرعت جريان درون تونل، دماي لايه دود در زير سقف تونل كاهش مي‌يابد تا اين كه در فاصله ۲۰۰ متري دماي لايه دود در سرعت جريان‌هاي ۰،۲،۳ تقريبا" برابر مي‌شود (شكل ۱۴) اين امر نشان‌گر از بين رفتن لايه‌بندي دودو كاهش تاثير سرعت جريان بر دماي لايه دود در زير سقف تونل است. روند اين تغييرات در شكل‌هاي(۸) تا (۱۴) نشان داده شده‌است.

۷- اعتبارسنجي نتايج

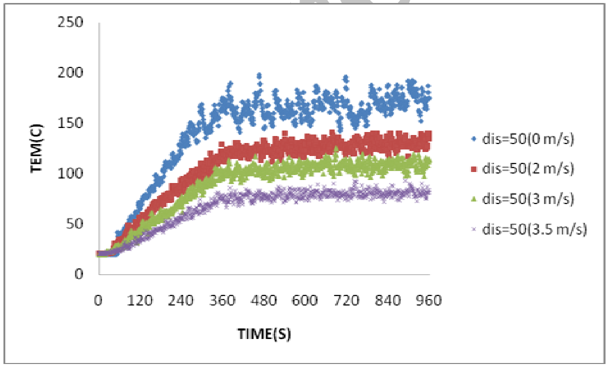
در شكل (۱۵) دماي لايه دود در سرعت‌هاي مختلف در محل آتش‌سوزي با منحني هيدروكربن مقايسه شد . با توجه به شكل، در سرعت جريان صفر، پس از ۳۰۰ ثانيه همگرايي بين دماي حاصل از طراحي با منحني هيدرو كربن مناسب است اما در سرعت جريان هاي ديگر، اختلاف بين نتايج حاصل از مدل سازي با منحني هيدروكربن زياد است. اين امر دوعلت دارد؛يكي آنكه منحني هيدرو كربن براي مواد با قابليت احتراق بالا در فضاي باز ارايه شده‌است و اين مواد در زمان كمي به دماي بيشينه خود مي‌رسند وديگر آنكه اثر سرعت جريان بر بيشينه دماي لايه دود است همان‌طور كه در بند ۵ گفته شد ،براي سرعت تهويه بي‌بعد كمتر از ۰/۱۹ دماي بيشينه دود مستقل از سرعت جريان هواي درون تونل و با دماي گاز حاصل از آتش‌سوزي در فضاي آزاد به طور تقريبي برابر است اما براي سرعت تهويه بي‌بعد بيش از ۰/۱۹ ،با افزايش سرعت جريان درون تونل، بيشينه دماي دود در زير سقف تونل كاهش مي‌يابد[۱۹].



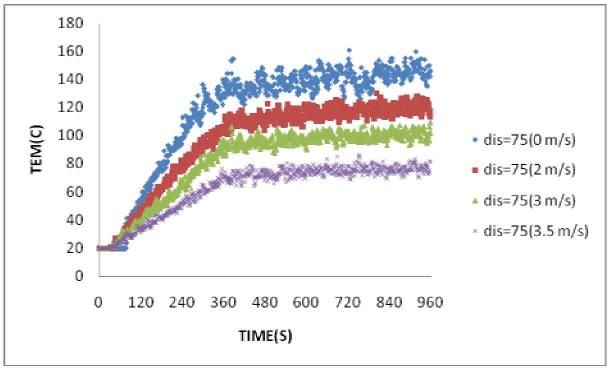
شكل ۸: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان هاي مختلف نسبت به زمان:محل آتش سوزي



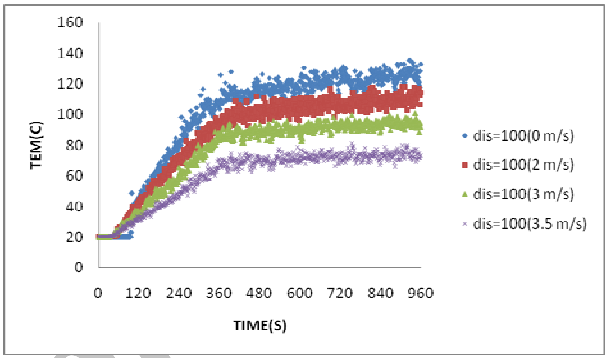
شكل ۹: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان‌هاي مختلف نسبت به زمان:در فاصله ۲۵ متري پايين‌دست آتش‌سوزي



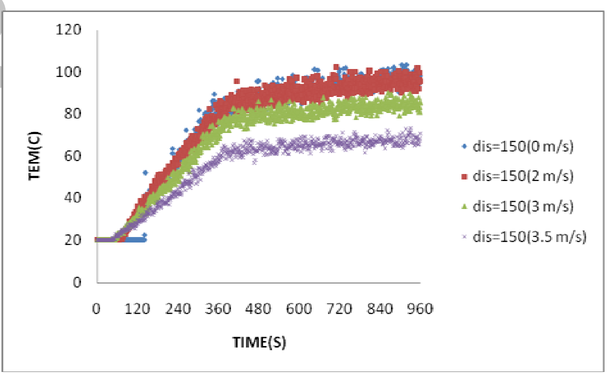
شكل ۱۰: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان‌هاي مختلف نسبت به زمان:در فاصله ۵۰ متري پايين‌دست آتش‌سوزي



شكل ۱۱: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان‌هاي مختلف نسبت به زمان:در فاصله ۷۵ متري پايين‌دست آتش‌سوزي

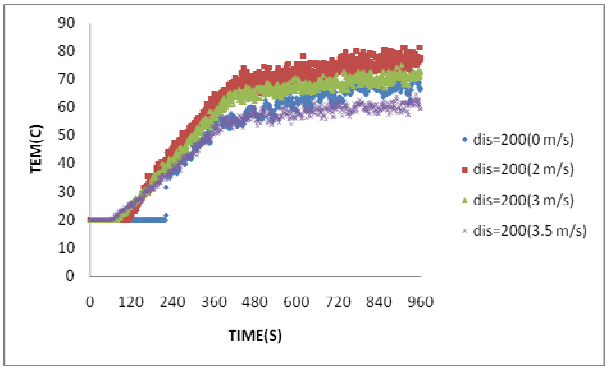


شكل ۱۲: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان‌هاي مختلف نسبت به زمان:در فاصله ۱۰۰ متري پايين‌دست آتش‌سوزي

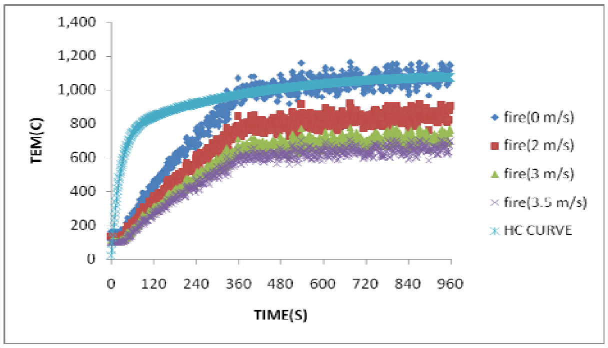


شكل ۱۳: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان‌هاي مختلف نسبت به زمان:در فاصله ۱۵۰ متري پايين‌دست آتش‌سوزي

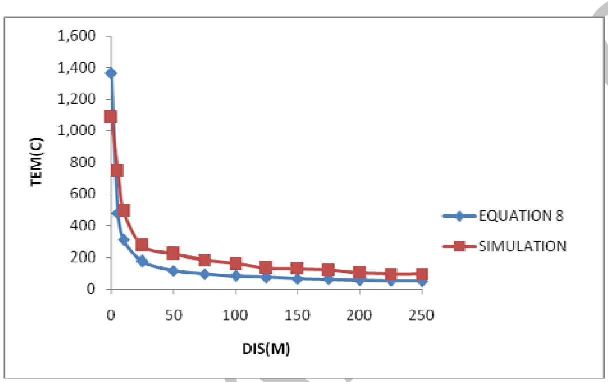
در شكل (۱۶) دماي لايه دود در زير سقف و در امتدا محور تونل با رابطه (۱)، در سرعت جريان صفر مقايسه شده است با توجه به شكل (۱۶)، در فاصله۰ تا ۱۰۰ متر، نتايج حاصل از طراحي ۵۰ تا ۸۰ درجه بيشتر از مقدار حاصل از رابطه تجربي است اما با افزايش فاصله، اين مقدار اختلاف كاهش يافته تا اينكه در فاصله ۲۰۰ متري مقدار اين اختلاف به كمتر ۳۰ درجه سانتي گراد برسد.



شكل ١٤: مقايسه دماي دود در زير سقف تونل در سرعت جريان‌هاي مختلف نسبت به زمان:در فاصله ۲۰۰ متري پايين‌دست آتش‌سوزي



شكل ۱۵: مقايسه نتايج حاصل از طراحي با منحني هيدرو كربن



شكل١٦:اعتبارسنجي دماي دود در زير سقف و در امتداد محور تونل

باتوجه به رابطه اوكا و اتكينسون (روابط (۱) تا(٤)) براي آتش‌سوزي با اندازه ۱۰۰ مگاوات, تونل به ارتفاع ۸ مترومقطع ۹۰ مترمربع, سرعت جريان ۱ متر درثانيه و دماي هواي محيط ۲۷ درجه سانتي‌گراد سرعت بحراني ۳/۳متر در ثانيه به دست مي‌آيد كه همخواني مناسبي با نتايج حاصل از طراحي عددي دارد . بنابراين براي جلوگيري از عقب‌زدگي دود حاصل از آتش‌سوزي با اندازه ۱۰۰ مگا وات درون تونل البرز سرعت ۳/۵متر در ثانيه پيشنهاد مي‌شود.

۸- نتيجه گيري

سرعت‌بحراني عاملي بازدارنده است که امکان خروج کاربران قبل از رسيدن نيروي امداد را فراهم مي‌آورد. انتخاب سرعت بالا،دليل بر افزايش ايمني درون تونل نيست زيرا سرعت بالا، باعث کاهش دماي لايه دود در بالادست آتش‌سوزي و از بين رفتن لايه‌بندي گاز گرم مي‌شود .بنابراين امکان خروج کاربران درون تونل قبل از رسيدن نيروي امدادي به کمترين حد مي‌رسد. با توجه به نتايج طراحي عددي و روابط تجربي، براي آتش‌سوزي درون تونل البرز بااندازه ۱۰۰ مگا وات، سرعت‌بحراني ۳/۵متر در ثانيه پيشنهاد مي‌شود.اين سرعت امکان خروج کاربران و انجام عمليات نجات را در کم ترين زمان ممکن فراهم مي‌سازد .

۹- منابع

[۱] نيکنام، بهزاد؛ طراحي سيستم تهويه تونل البرز(آزاد راه تهران شمال)؛ ص. ۱-۱۳۰؛پايان نامه کارشناسي ارشد دانشگاه صنعتي امير کبير؛تهران؛ ۱۳۸۸.

[۲] Vuilleumier F.; Weatherill A.; Crausaz B.;“Safety aspects of railway androad tunnel: example of the Lotschberg railway tunnel and Mont-Blancroad tunnel”, Tunnelling and Underground Space Technology.

[۳] Hu L.H.; Huo R.; Chow W.K.;” Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires”, Experimental Thermal and Fluid Science , pp1468–1483,2008.

[۴] Jojo S.M. Li; Chow W.K.; “Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems”, Tunnelling and Underground Space Technology, pp 435–452,2003.577–586,2004.

[۵] Kurioka H.; Oka Y.; Satoh H.; Sugawa O.;”Fire Properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels” Fire Safety Journal, pp 319–340,2003.

[۶] Danziger N.H.; Kennedy W.D.;“Longitudinal ventilation analysis for the Glen wood canyon tunnels” Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp 169–186,1982.

[۷] Oka Y.; Atkinson G.T.;” Control of smoke flow in tunnel fires”, Fire Safety Journal,PP 305-332,1995.

[۸] Saito N.; "Experimental Study on Fire Behavior in a Wind Tunnel with a Reduced Scale Model", Second International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, pp 303-310,1995.

[۹] EUREKA-Project EU Firetun.;” Fires in Transport Tunnels:Report on Full-Scale Tests” Du¨ sseldorf, pp 75–100,1995.

[۱۰] Brinckerhoff.; "Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program", Comprehensive Test Report. Massachusetts Highway Department, pp1–90,1995.

[۱۱] Jojo S.M.; Chow H.;“Large eddy simulations for studying tunnel smoke ventilation” Tunnelling and Underground Space Technology, pp225-235,2004.

[۱۲] Hu L.h.; “On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires” Tunnelling and Underground Space Technology, pp45-54,2005.

[۱۳] Gao P.Z.; Liu S.L.; Chow W.K.; Fong N.K.;"Large eddy simulations for studying tunnel smoke ventilation" Tunnelling and Underground Space Technology, pp.

[۱۴] Lonnermark A.;”on the characteristic of fires in tunnels." Phd thesis lund institute of technology, pp 1-122,2005.

[۱۵] Wang H.Y.;"Prediction of soot and carbonmon oxide production in a ventilated tunnel fire by using acomputer simulation" Fire Safety Journal, pp 394-406,2009.

[۱۶] Lin C.; Chuah Y.k.;"A study on long tunnel smoke extraction strategies by numerical simulation".Tunnelling and Underground Space Technology, pp 522–530,2008 .

[۱۷] Wang Y.; Zhu D.;" Full-scale experiment research and theoretical study for fires in tunnels with roof openings"Fire Safety Journal , pp 339-348,2009.235,2004.

[۱۸] Li Y. ; Lei B. ; Ingason H. ;" The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires. Fire Safety Journal , pp 204-210,2011.

[۱۹] Li Y. ; Lei B. ; Ingason H. ;" The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires. Fire Safety Journal , pp 204-210,2011.