

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Барбара М. Видаковић

**ПОБОЉШАЊЕ ЦФД МОДЕЛА  
РАЗВОЈА ПОЖАРА У ТУНЕЛУ НА  
ОСНОВУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ  
ПОДАТАКА**

докторска дисертација

Београд, 2012

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Barbara M. Vidaković

**IMPROVEMENT OF CFD MODELS OF  
TUNNEL FIRE DEVELOPMENT BASED  
ON EXPERIMENTAL DATA**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012

**Ментор**

др Србислав Генић, редовни професор, Универзитет  
у Београду Машински факултет

**Чланови комисије**

др Бранислав Јаћимовић, редовни професор,  
Универзитет у Београду Машински факултет

др Милош Бањац, ванредни професор, Универзитет у  
Београду Машински факултет

др Миролjub Аџић, професор емеритус, Универзитет  
у Београду Машински факултет

др Дорин Лелеа, ванредни професор, Универзитет у  
Темишвару, Машински факултет Политехника,  
Румунија

## Захвалница

Овом приликом желим да се захвалим Prof. Dr. Ulrich Krause који ми је омогућио да у склопу специјализације неопходне за израду оваквог рада, проведем девет месеци као гостујући научник на Федералном Институту Бам - Bundesanstalt Für Materialforschung Und Prüfung у Берлину - Немачка, током којих ми је указао срдечно гостопримство. Такође се захваљујем председнику БАМ Института Prof. Dr. rer. nat. Manfred Hennecke, директору одсека VII Dr.-Ing. Andreas Rogge, супервизору Dr.-Ing. Christian Knaust и свим колегама, а нарочито из одсека VIIЗ, на сарадњи и указаној пажњи. На свесрдној стручној помоћи, дивној сарадњи и пријатељству током рада и живота у Берлину посебно се захваљујем драгој др Ирис Вели.

Директору Dr. rer. nat. Horst Starke и dipl.-ing. Klaus-Jürgen Kohl, као и свим колегама са Института за пожарна испитивања - Institute der Feuerwer Sachen-Anhalt у Хејротсбергу - Немачка, у коме су вршена експериментална истраживања се захваљујем на сарадњи и помоћи.

Господину Dipl.-Ing. Michael Schnell, колеги, дугогодишњем пријатељу и врхунском светском стручњаку за заштиту од пожара, срдечно се захваљујем на предлогу избора теме за докторат, као и на свестраној помоћи током мог научног развоја.

Велику захвалност дугујем професору др Слободану Ристићу, директору Високе инжењерске школе струковних студија – Техникум Таурунум, на указаном поверењу, стрпљењу и што је увек излазио у сусрет мојим потребама везаним за израду дисертације.

Проф. др Ивану Аранђеловићу се захваљујем на сарадњи, и материјалној подршци коју ми је као руководиоца научних пројеката обезбедио за докторске студије током мог рада на Машинском факултету.

Искрено се захваљујем на корисним сугестијама проф. др Дорину Лелеи, са Машинског факултета Политехника у Темишвару – Румунија.

Такође желим да се захвалим проф. др Браниславу Јаћимовићу на разумевању, стрпљењу и подршци коју ми је пружио и помогао да истрајем и завршим дисертацију.

Захвалност дугујем проф. др Мирољубу Ацићу, који ме је са великим ентузијазмом водио кроз докторске студије, на драгоценим стручним и научним саветима и пријатељским разговорима.

Проф. др Миловану Видаковићу, мом оцу, захваљујем се на љубави и подршци коју ми је пружио кроз живот и због кога сам заволела неконртолисано сагоревање. Хвала му што је пренео своје знање на мене и научио ме да поштујем праве вредности.

Ментору проф. др Србиславу Генићу се искрено захваљујем што се прихватио да руководи изработом ове дисертације, као и што је својим подстицајима, конструктивним примедбама, и стручним сугестијама, допринео квалитету овог рада.

Највећу захвалност дугујем проф. др Милошу Бањцу који ми је показао лепоту и моћ нумеричких симулација, и пажљиво преносио своја знања. Захваљујем му се на издвојеном времену, за показано стрпљење за сва моја питања и идеје, на посвећености са којом ме је водио кроз рад, као и несебичној стручној и људској подршци, без које овај рад не би био оно што јесте.

Посебно се захваљујем својој мајци Борки која је у сваком тренутку била уз мене и својом великом љубављу учинила да истрајем.

## ПОБОЉШАЊЕ ЦФД МОДЕЛА РАЗВОЈА ПОЖАРА У ТУНЕЛУ НА ОСНОВУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА

### РЕЗИМЕ

У овој дисертацији, посвећеној проблематици математичког описивања процеса развоја пожара у тунелу коришћењем експерименталних података, приказан је поступак кориговања пакета ЦФД (CFD) модела, у делу који се односи на дефинисање граничних услова за горуће површине. Кориговањем комплексног пакета CFD модела, који се састоји од спрегнутих „ $k - \varepsilon$ “ модела турбулентних напона, модела великих вртлога, модела топлотног зрачења - тзв. модел дискретних ордината и модела сагоревања - тзв. модела устаљених ламинарних пламенова, омогућено је да се тачније опишу и предвиде збивања процеса сагоревања, која се остварују при овој врсти сложеног, неизотропног и турбулентног струјања гасова у тунелу.

Детаљном анализом и поређењем експерименталних и нумеричких резултата, кроз сагледавање физичке суштине свих процеса који утичу на сагоревање, уочено је да основни пакет ЦФД модела, процес сагоревања нумерички поједностављено своди на процес мешања, а без могућности да обухвати појаву локалног недостатка кисеоника, тј. моделира готово непосредну зависност између процеса мешања гасова и ослобођене количине топлоте у процесу сагоревања. Корекцијом модела у делу дефинисања граничног услова за горућу површ, успостављањем директне корелације између измерене вредности брзине промене масе горива и ослобођене количине топлоте са горуће површине, избегнуто је не само улажење у сложене стехиометриске процесе сагоревања, него и избегнут потенцијано могући недостатак стандарног ЦФД пакета модела.

Иако се основана разлика у квалитету предвиђања основног и унапређеног модела може најпрегледније сагледати спровођењем престављеног „ $\chi^2$ “ теста, квалитативно значајно побољшање уочљиво је и кроз непосредно поређење промене температуре гасова на мерним местима изнад и низводно од пламена. Уочљиво је да промена температуре гасова у коригованом моделу, на само изражено у бројним вредностима, него и по карактеру криве, даје далеко боља предвиђања од основног модела.

Кључне речи и појмови: пожар, пожар у тунелу, ЦФД моделирање, гранични услов, моделирање турбуленције

Докторска дисертација припада техничким наукама, односно машинству, односно ближе научној области Процесна техника.

УДК број: 622.612:614.841.48:642.19(043.3)

# **IMPROVEMENT OF CFD MODELS OF TUNNEL FIRE DEVELOPMENT BASED ON EXPERIMENTAL DATA**

## **SUMMARY**

This doctoral thesis, presenting problems of mathematical description of the tunnel fire development process with the use of experimental data, outlines the procedure of correction of CFD models package, in the section pertaining to definition of the boundary conditions for burning surfaces. The correction of the complex package of CFD models, comprising coupled „ $k-\varepsilon$ “ models of turbulent flows, large eddy simulation model, thermal radiation model of discrete ordinates and steady laminar flamelet model of combustion enables more detailed interpretation and prediction of the burning process effects occurring during this type of complex, non-isotropic and turbulent flow of gases in tunnel.

Detailed analysis and comparison of experimental and numerical results, through consideration of the physical structure of all processes affecting combustion, indicates that basic package of CFD models reduces the burning process to mixing process by numerical simplification, without possibility of including the occurrence of local lack of oxygen, i.e., modelling almost direct correlation between the process of mixing gasses and the heat release rate in the burning process. Correction of model in the section pertaining to definition of boundary condition for burning surface, by establishing direct correlation of the measured value of the speed of change of the fuel masses and amount of released heat from the burning surface, helped to avoid not only involvement with complex stoichiometric process of burning, but also potential imperfection of standard CFD modelling package.

Although the established difference in the quality of the prediction of the basic and improved model can best be presented by implementation of the presented „ $\chi^2$ “ test, qualitatively significant improvement is also evident through direct comparison of changes of temperature of gases at the measuring points above and downstream from the flame. It is indicative that change of temperature of gases in corrected model, expressed not only in numerical values but also by the curve character, provides much better predictions than basic model.



**Key words and terms:** fire, tunnel fire, CFD modelling, boundary condition, turbulence modelling

The doctoral thesis belongs to technical engineering sciences, i.e. mechanical engineering, or, more precisely to the scientific area: Process Engineering.

UDC no: 622.612:614.841.48:642.19(043.3)

## САДРЖАЈ

<b>1. УВОД</b> .....	1
<b>2. ОСНОВНЕ КРАКТЕРИСТИКЕ ПОЖАРА У ТУНЕЛИМА</b> .....	4
2.1. Историја најзначајнијих пожара у саобраћајним тунелима.....	4
2.2. Опасности у тунелима.....	4
2.3. Основне поставке.....	6
2.4. Сценарио догађаја.....	8
<b>3. ТЕРМОДИНАМИКА ПОЖАРА У ТУНЕЛИМА</b> .....	14
3.1. Пожарно оптерећење возила у тунелу.....	14
3.2. Брзина сагоревања.....	15
3.2.1. Масена брзина сагоревања.....	16
3.2.2. Масена брзина сагоревања за природно проветравање са ограниченом количином ваздуха.....	17
3.2.3. Брзина сагоревања за принудно проветравање са ограниченом количином ваздуха.....	18
3.2.4. Брзина сагоревања у тунелима и утицај различитих врста вентилације...	19
3.3. Време трајања пожара.....	25
3.4. Биланс енергије пожара у тунелу.....	27
3.4.1. Развијена температура пожара.....	27
3.4.2. Ослобођена енергија у тунелу који је у пожару.....	28
3.4.3. Одата енергија кроз отворе.....	29
3.4.4. Одата енергија на зидове.....	29
3.4.5. Укупан прелаз топлоте на зид.....	30
3.4.6. Специфична одата енергија гасовима.....	31
3.4.7. Одата енергија на загревање ваздуха који улази у тунел.....	33
3.4.8. Биланс топлоте.....	33
3.4.9. Утицај оптерећења пожара на температуру у јединици времена.....	35
3.4.10. Линеарна брзина сагоревања.....	36
3.4.11. Ослобађање и одавање топлоте.....	38
3.4.12. Одређивање температуре у пожару.....	42
3.5. Ширење пожара.....	43

<b>4. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	50
<b>5. ПРИКАЗ И АНАЛИЗА РЕПРЕЗЕНТАТИВНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА</b> .....	61
5.1. Експериментална истраживања пожара у Ватрогасном институту Сашен-Анхалт (Хејротсбергу, Немачка ).....	61
5.2. Геометрија.....	62
5.3. Мерење температуре.....	67
5.4. Мерење протока топлоте.....	70
5.5. Мерење брзине гасова.....	70
5.6. Мерење масе горива.....	74
5.7. Прикупљање података, видео записа и информација о времену.....	75
<b>6. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ И РЕЗУЛТАТИ НУМЕРИЧКИХ СИМУЛАЦИЈА</b> .....	79
6.1. Основне билансне једначине.....	79
6.1.2. $k - \varepsilon$ модел турбулентних напона.....	81
6.1.3. Модел великих вртлога ( <i>Large Eddy Simulation Model</i> ).....	83
6.1.4. Модел топлотног зрачења.....	83
6.1.5. Модел сагоревања.....	85
6.1.6. Нови експериментално-нумерички модел.....	86
6.2. Домен интеграције и гранични услови.....	89
6.2.1. Геометрија домен интеграције.....	89
6.2.2. Гранични (просторни и временски) услови.....	90
6.3. Поставка нумеричког проблема.....	93
6.4. Резултати нумеричких симулација.....	98
<b>7. ЗАКЉУЧАК</b> .....	114
<b>8. ЛИТЕРАТУРА</b> .....	117
<b>ПРИЛОГ 1</b>	
9. Одређвање одступања резултата добијених нумеричким симулацијама од експерименталних података - пеарсонов $\chi^2$ тест.....	125

## **ПРИЛОГ 2**

10. Поређење температура и брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем основног модела.....	127
10.1. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем основног модела.....	127
10.2. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем основног модела.....	152

## **ПРИЛОГ 3**

11. Поређење температура и брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела.....	164
11.1. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела.....	164
11.2. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела.....	179

## СПИСАК ОЗНАКА

### Латинична слова

$a$	[-]	коэф. отпора и трења ваздуха на уласку кроз отвор у тунел (0,7)
$a$	[-]	коэффицијент апсорпције
$A$	$m^2$	површина
$a_f$	$m^2/s$	топлотна дифузивност флуида
$A_F$	$m^2$	површина свих отвора на тунелу
$A_{Re}$	$m^2$	пресек отвора за улазак ваздуха
$A_w$	$m^2$	површина зида
$b$	m	ширина отвора тунела
$c, C, C', C_A, C_B, Sh_t$	[-]	емпиријске константе
$C_{pg}$	$kJ/(m^3 K)$	специф. запреминска топлота гаса за константни притисак
$C_{PL}$	$kJ/(N m^3 K)$	специф. топлота ушлог ваздуха за константни притисак
$c_p$	$kJ/(kg K)$	специфична топлота пиролизе течности или чврсте материје
$c_p$	$kJ/(kg K)$	специфични топлотни капацитет при сталном притиску
$C_d, C_D, C_g, C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}^*, C_{f1}, C_{f2}$	[-]	емпиријске константе модела турбулентних напона
$E_{Br}$	$kJ/(m^2 h)$	зрачење емитовано од ватре
$E_0$	$kJ/(m^2 h)$	почетно зрачење
$\tilde{F}_i = F_i + f_i$	N/kg	тренутна, осредњена и флукуациона специфична (“запреминска”) сила
$f_i = \bar{f}_i + f_i'$	[-]	масени удео $i$ -те фракције горива у смеши
$G$	$Nm^3/kg$	запремина гаса
$G_L$	$Nm^3/kg$	запремина ваздуха
$G$	[-]	функција филтрације која одређује размеру вртлога
$\tilde{H} = H + h$	J/kg	тренутна, осредњена и флукуациона специфична енталпија
$h'$	m	висина отвора до нулте линије
$h$	m	висина отвора
$h$	m	средња висина пламена
$H_i$	$kJ/kg$	стварна топлотна моћ
$I$	$W/m^2$	интензитет зрачења

$k = 0,5 \overline{u_i u_i}$	$\text{m}^2/\text{s}^2, \text{J/kg}$	специфична кинетичка енергија турбуленције
$L_{\min}$	$\text{m}^3/\text{kg}$	минимална количина ваздуха која је потребна да би сагорео 1 kg запаљиве материје
$L_v$	$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$	количина ваздуха убаченог у тунел принудним проветравањем
$\ell$	m	карактеристична дужина
$l_m$	m	удаљеност млазничара
$m$	kg	Маса
$n$	[-]	индекс преламања
$\tilde{P} = P + p$	Pa	тренутни, осредњени и флукуациони статички притисак
$Pr = Pr_h = v_f / a_f$	[-]	Прандтлов број
$Pr_\varepsilon$	[-]	Прандтлов број за дифузију дисипације кинетичке енергије турбуленције
$Pr_k$	[-]	Прандтлов број за дифузију кинетичке енергије турбуленције
$Pr_\omega$	[-]	Прандтлов број за дифузију $\omega$
$P_i$	$\text{kJ}/\text{m}^2$	пожарно оптерећење
$Q_R$	$\text{kJ}/\text{h}$	ослобођени топлотни флуks сагоревањем
$Q_F$	$\text{kJ}/\text{h}$	део одатог топлотног флуksа зрачењем кроз отворе тунела
$Q_w$	$\text{kJ}/\text{h}$	део одатог топлотног флуksа на загревање зидова тунела
$Q_g$	$\text{kJ}/\text{h}$	део одатог топлотног флуksа одведеног гасовима
$Q_L$	$\text{kJ}/\text{h}$	део одатог топлотног флуksа одатог ваздуху током принудног проветравања
$Q_R$	$\text{kJ}/\text{h}$	топлота од зрачења пламена
$Q_K$	$\text{kJ}/\text{h}$	топлота од конвекције
$Q_L$	$\text{kJ}/\text{h}$	количина топлотног флуksа пожара утрошена на загревање ваздуха
$Q$	$\text{kJ}/\text{h}$	укупна количина топлоте
$q_R$	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$	специфичн одат топлоти флуks
$q_w$		кофицијент преноса топлоте
$q$	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$	специфични топлотни флуks сагоревања
$q''$	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$	развијена топлота по $kg$ гориве материје
$R$	$\text{J}/(\text{kg K})$	индивидуална гасна константа
$\vec{r}$	m	вектор положаја

$R$	kg/h	масена брзина сагоревања
$R_l$	m/h	линеарна брзина сагоревања
$R_1$	kg/h	брзина сагоревања зависна од количине ваздуха који улази кроз отвор за природно проветравање
$R_2$	kg/h	брзина сагоревања зависна од количине ваздуха који улази кроз отвор за принудно проветравање
$R_{1+2}$	kg/h	брзина сагоревања зависна од количине ваздуха који улази кроз отвор за природно и принудно проветравање
$\vec{s}$	m	вектор правца
$\vec{s}'$	m	вектор правца расипања
$s$	m	дужина пута
$S$	m <sup>2</sup>	површина пода тунела под пожаром
$S_m$	kg/(m <sup>3</sup> s)	„изворни“ члан у билансној једначини масеног удела $i$ – те фракције горива у смеси, који искључиво узима у обзир трансфер течног или чврстог горива у гасну фазу
$S_{ij}$	s <sup>-1</sup>	осредњени тензор брзине деформисања
$t$	s	време
$t_w$	°C	температура зида
$t_{br}$	°C	температура пожара
$t_0$	°C	почетна температура
$t_p$	°C	температура паљења гаса
$t_L$	°C	температура спољног ваздуха
$T_1$	K	температура на крају пожара
$T_2$	K	температура на почетку пожара
$T$	K	температура околине
$\tilde{T} = T + \theta$	K	тренутна, осредњена и флукуациона температура
$u_m$	m/h	средња брзина ваздуха који улази у тунел
$u_n$	m/h	брзина ваздуха код механичког проветравања створена вентилаторима
$U_i$	m/s	вектор осредњене брзине ( $i = 1, 2, 3$ )
$u_i$	m/s	део вектора брзине која флукуира ( $i = 1, 2, 3$ ), тзв. вектор флукуационе брзине
$\overline{u_i u_j}$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Рејнолдсов или турбулентни напон (кинематски облик)

$U_1, U_2, U_3$	m/s	компоненте осредњених брзина
$\tilde{U}_i = U_i + u_i$	m/s	вектор тренутне, осредњене и флукуационе брзине ( $i = 1, 2, 3$ )
$U^+ = U/U_\tau$	[-]	релативна брзина
$U_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$	m/s	динамичка или привидна брзина (брзина смицања)
$V$	$m^3$	запремина
$V$	$m^3$	просторни домен
$V_i$	$m^3$	запремина материје
$X$	[-]	хемијска константа за запаљиву материју
$x_i$	m	вектор положаја
$x_1, x_2, x_3$	m	Координате
$y_n$	m	нормално растојање од чврсте површи (зида)
$y^+ = U_\tau y_n / \nu_f$	[-]	бездимензијско растојање од чврсте површи (зида)

## ГРЧКА СЛОВА

$\delta_{ij}$	[-]	Кронекеров оператор
$\alpha_{rez}$	$\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$	кофицијент прелаза топлоте
$\beta$		кофицијент прелаза топлоте зрачењем
$\Delta i$	$\text{kJ}$	Енталпија
$\varepsilon_w$		кофицијент емисионог односа
$\varepsilon$	$\text{m}^2/\text{s}^3$	осредњена дисипација кинетичке енергије турбуленције $k$ или само дисипација
$\kappa$		Фон Караманова константа
$\lambda$	$\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$	кофицијент провођења топлоте
$\lambda_f$	$\text{W}/(\text{mK})$	топлотна проводност флуида
$\mu_f = \rho\nu_f$	$\text{Pa s, kg}/(\text{m s})$	динамичка вискозност флуида
$\mu_t = \rho\nu_t$	$\text{Pa s, kg}/(\text{m s})$	динамичка турбулентна вискозност
$\mu_f \Psi_\mu(U_i)$	$\text{N}/\text{m}^3$	функција вискозне дисипације кинетичке енергије осредњених брзина
$\mu_t \Psi_\mu(u_i)$	$\text{N}/\text{m}^3$	функција вискозне дисипације флукуационих брзина
$\nu_f$	$\text{m}/\text{s}$	кинематска вискозност флуида
$\nu_t$	$\text{m}/\text{s}$	кинематска турбулентна вискозност
$\sigma_s$	[-]	кофицијент расипања



$\sigma$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$	Стефан- Болцманова константа
$\sigma_{12}$	$\text{N/m}^2$	укупни “напон” у флуиду
$\tau$	h	време трајање пожара
$\tau_\tau$	$^\circ\text{C}$	максималне вредности температуре у пожару
$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j}$	$\text{N/m}^2$	Рејнолдсов или турбулентни напон (динамички облик)
$\tilde{\rho} = \rho + \rho'$	$\text{kg/m}^3$	тренутна, осредњена и флукутирајућа густина флуида
$\rho_i$	$\text{kg/m}^3$	привидна густина материјала
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	густина гориве материје
$\Phi$	[-]	фаза функције
$\tilde{\Phi} = \Phi + \phi$		општа ознака за променљиву величину, њен тренутни, осредњени и флукутациони (турбулентни) део
$\phi$	$\text{kg/s}$	масени проток фракције
$\Omega'$	sr	просторни угао
$\Gamma_f = \mu_t / \sigma_t$	$\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$	однос динамичка турбулентна вискозност и емпиријске вредности $\sigma_t$

## ДЕСНИ ДОЊИ ИНДЕКСИ

amb	околина
aps	апсолутно
f	флуид
i	индекс елементарне јединице
$i, j, k, l, m$	индекси координатних оса $i = 1, 2, 3$ ; $j = 1, 2, 3$ ; $k = 1, 2, 3$ итд.
izlaz	излаз из домена интеграције (домена прорачуна)
k	кинетичка енергија турбуленције
min	минимум
s	површина
ul	улаз
t	време
V	запремина
$\varepsilon$	дисипација кинетичке енергије турбуленције
$\tau$	Рејнолдсови (турбулентни) напони
$\Phi$	општа (свака) променљива
user	корисник
ref	референтно
w	зид
F	отвори

## Остали симболи

$P$	динамички облик чланова стварања ( <i>production</i> )
-----	--------------------------------------------------------

## 1. УВОД

Велики број, по последицама катастрофалних пожара, који су се крајем прошлог и почетком овог века догодили у великим саобраћајним тунелима Европе, покренули су многе веома скупе и обимне научно-истраживачке пројекте. Започети пре више од 20 година, а и данас активни, ови пројекти у суштини су имали задатак да дају одговор на три основна питања. Прво се односило на дефинисање мера и поступака које је потребно спровести да би се спречили, односно максимално смањили ризици настанка пожара у тунелима, друго – знатно „скупље“ требало је да одговор на физичко-хемијску суштину процеса сагоревања и појава које се дешавају прилоком настајања и током пожара, као и да објасне динамику његовог ширења. Треће питање, било је усмерено на проналажење одговора, на могућности контроле пожара, односно поступака и начина његовог ефикасног гашења, као и поступака за брзе евакуације путника, робе и материјалних добара из зона захваћених пожаром.

Реализација ових пројекта текла је паралелно у неколико Европских и светских института. У намери проналажења одговора на последња два питања, а суочавајући се са недостатком елементарних података о процесима сагоревања типичним за пожаре у тунелу, започета су бројна експериментална истраживања. Ова истраживања била су вршена у већ постојећим тунелима, или за ту сврху специјално изграђеним и опремљеним тзв. експерименталним тунелима. Због разарјућих последица које изазива пожар и изузетно великих трошкова, показало се да постојећи тунели нису погодни за обављање експеримената. Због тога, а и из разлога смањивања тошкова, новоизграђени експериментални тунели, обично су грађени тако да буду мањих димензија од реалних, али и да одговарају условима којима би се могли, у скаладу са теоријом сличности остварити услови „слични“ онима у реалним тунелима.

У оквиру анализе и прикупљања података о физичко хемијским процесима, спроведени експерименти и анализа добијених података били су усмерени и на решавање неких практичнијих проблема. Међу њима, као најзначајнији могу се издвојити проблеми проналажења међусобне зависности између површине захваћене пожаром (пожарно оптерећење), количине (протока) ваздуха, брзине

сагоревања, времена трајања пожара, величине и геометрије попречног пресека и дужине тунела, енергије пожара и максималне температуре продуката сагоревања. Обрадом и статистичком анализом прикупљених драгоцених експерименталних података полако су се успостављале одговарајуће аналитичке зависности између појединих карактеристичних величина. Међутим, овај класични приступ, због своје једнодимензионалности, није могао да задовољи све веће захтеве и потребе истраживача. Због тога је тек са развој нумеричке механике флуида као и ЦФД-а (*Computational Fluid Dynamics*) и њеном применом у овој проблематици учињен следећи квалитативан скок у односу на претходни приступ. Због особине ЦФД приступа, да омогућава да се без обзира на сложеност геометријског простора, граничних просторних и временских услова, релативно лако, предвиде и веома сложена поља брзина, температура и концентрација, чинило се да ће он омогућити „коначно“ решење проблема предвиђања и анализе пожара. Међутим, показало се да до сада развијени модели турбулентних напона за случај тзв. хомогене турбуленције (турбулентног струјања код којег постоји релативна "једноставност" струјања основног тока, а тиме и могућност да се изолују и на адекватан начин моделирају доминантни процеси турбулентних интеракција) нису у могућности да са сигурношћу предвиде развој пожара. Разлог овоме свакако треба тражити у изузетно нехомогеним турбулентним токовима, са великим градијентима температурног и поља притиска и њима изазваним јаким узгонским силама приликом настајања и ширења пожара. Другим речима, показало се да нумерички – ЦФД (*CFD*) приступ показује одређене недостатке и да резултати добијени симулацијама помоћу „стандардних“  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  ЦФД (*CFD*) модела турбулентних напона нису у стању да у потпуности тачно предвиде и опишу појаве настале током пожара.

Због тога је, уз систематизацију постојећих сазнања и физичких процеса из области пожара у тунелима, те математичких модела којима се они описују, основни циљ ове дисертације добијање побољшаног математичког модела, чијом би употребом у нумеричкој симулацији, било могуће да се квалитетније опишу, односно предвиде струјање флуида, поље температуре и концентрације. Примена побољшаног *CFD* модела би омогућила симулирање настанка и развоја пожара

како на постојећим тунелима, тако и на новопроектованим, и утицала би на мере које треба применити ради заштите људи и материјалних добара .

Предвиђено кориговање CFD модела за нумеричку симулацију пожара, обављено је на основу сопствених досадашњих нумеричких испитивања, препорука публикованих у стручној и научној литератури, те на основу доступних експерименталних података. Наведена истраживање спроведена су током рада на Катедри за процесну технику Машинског факултета Унивезитета у Београду, која у свом саставу има лабораторију за пожарна испитивања и већ неколико година се бави изучавањем појава развоја и могућности контроле, тј. спречавања настанка пожара, као и током студијског боравка на Институту ВАМ - Bundesanstalt Für Materialforschung Und –Prüfung у Берлину, Немачка, у оквиру пројекта ЦФД симулација пожара у тунелима, на коме сам била ангажована као гостујући научник у периоду од 9 месеци.

## **2. ОСНОВНЕ КРАКТЕРИСТИКЕ ПОЖАРА У ТУНЕЛИМА**

### **2.1. Историја најзначајнијих пожара у саобраћајним тунелима**

Иако су највише пажње привукли пожари у тунелима са аутомобилским саобраћајем, не могу се занемарити ни пожари железничког саобраћаја или метроа. Од пожара који су се десили у тунелима, са катастрофалним последицама у односу на број погинулих и висину материјалне штете, могу се издвојити пожари који су приказани у табели 2.1. [Carvel, 2005, EuroTAP, 2008]. Из табеле се види да је у великом броју реалних пожара тунела постојао сценарио са неколико возила и са смртним случајевима. Пожари су праћени у периоду 1978 до 2007 године.

### **2.2. Опасности у тунелима**

Неопходно је истаћи да су студије углавном фокусиране на почетну фазу развоја пожара. Само неколико студија се посебно бави режимом потпуно развијених пожара. Ово је разумљиво, јер је приоритет заштита живота људи који се затекну у тунелу и њихова евакуација у току развоја пожара. Такође, да би се избегло зрачење топлоте у тунелу потребно је искористити прве тренутке од настанка пожара, почетну фазу, када је температура у пожару ниска да би ватрогасци могли да интервенишу. Код развијеног пожара топлотно зрачење постаје битан фактор током гашења пожара. Први тренуци захтевају само 1/3 расположиве воде за гашење пожара, хлађење и апсорпцију зрачења.

Одређени параметари су показали да се пожари у тунелу могу упоредити са пожарима у затвореном простору као што је стан, складиште или производни погон уз одређена одступања.

**Табела 2.1.:** Пожари који су се десили у тунелима са катастрофалним последицама у односу на број погинулих и висину материјалне штете [Carvel, 2005, EuroTAP, 2008]:

Тунел	Година	Број погинулих	Возила на којима је почео пожар	Камион	Бр. уништених возила
<i>Velsen</i> , Холандија	1978	5	Камион и ауто, удес	Да	6
<i>Nihonzaka</i> , Јапан	1979	7	4 Камиона и 2 аутомобила, удес	Да	189
<i>Kajiwara</i> , Јапан	1980	1	Камион, удес	Да	2
<i>Sakai</i> , Јапан	1980	5	Камион, удес	Да	10
Caldecott, Сад	1982	7	Аутобус, камион, ауто, удес		3
<i>Salang</i> , Авганистан	1982	Много	Разна возила		Непознато
<i>Pecorile</i> , Италија	1983	9	Камион, удес	Да	Непознато
<i>L'Arme</i> , Француска	1986	3	Ауто, удес		1
<i>Gutefens</i> , Швајцарска	1987	2	Ауто, удес	Да	8
<i>Serra a Ripoli</i> , Италија	1993	4	Ауто, удес	Да	16
<i>Huguenot</i> , Јужна Африка	1994	1	Аутобус, пожар мењача		1
<i>Pfander</i> , Аустрија	1995	3	Аутобус, камион, аутомобили, удес	Да	3
<i>Isola delle Femmine</i> , Италија	1996	5	Аутобус, камион, аутомобили, танкер, удес		22
<i>Mont Blanc</i> , Француска, Италија	1999	39	Камион, пожар мотора	Да	34
<i>Tauern</i> , Аустрија	1999	12	Камион, ауто, удес	Да	40
<i>Gleinalm</i> , Аустрија	2001	5	2 Аутомобила, удес		2
<i>St. Gotthard</i> , Аустрија	2001	11	Камион, удес	Да	23
<i>Floyfjell</i> , Норвешка	2003	1	Ауто, удес		1
<i>Baregg</i> , Швајцарска	2004	1	2 Камиона, 1 ауто, удес	Да	3
<i>Chambéry</i> , Француска	2005	2	камион	Да	4
<i>Eriskirch</i> , Немачка	2005	5	2 аутомобила, удес		непознато
<i>Chur</i> , Швајцарска	2006	9	Аутобус, 2 аутомобила, удес		3
<i>Melbourne</i> , Аустралија	2007	3	3 камиона, 4 аутомобила, ланчани судар	Да	7
<i>Lecco</i> , Италија	2007	2	Камион, ланчани судар		непознато

Ватрогасци су у борби са несрећама са или без пожара лимитирани њиховим физичким могућностима и ефикасношћу њихове технике, која је доведена до граница деловања. Само уз сагледавање свих фактора могу се одредити ефикасне методе.

На основу неких истраживања, да би ватрогасци могли ефикасно да се боре са опасностима које могу да се појаве у тунелу, потребно је познавање следећег:

- која су основна ограничења ватрогасаца
- карактеризација неконтролисаног ризика
- могуће тактичке мере приступа пожару
- неопходна техничка опрема и алати
- лична заштитна опрема.

### **2.3. Основне поставке**

Највећи број саобраћајних несрећа у тунелима изазива понашање возача. Несреће без појаве пожара или експлозије представљају лакши проблем за ватрогасце и спасавање. Зато се прво поставља питање о типу, карактеристикама развоја и току догађаја. У складу са могућим догађајима по Коинигу [Koinig 1999], предложена је табела 2.2. са следећим питањима.

Ако се током пожара стварају додатни проблеми, као што су хемијске и физичке реакције, тада могу радијус дејства и последице да буду промењени. Ток развоја пожара мења услове безбедности између осталог и због могућег испарења запаљивих материја. Као резултат концентрације испарења може доћи до експлозије.

Пожар и експлозија у тунелу представљају велики ризик. Ако је предвиђен сценарио прекорачен, или се десила неподвижена експлозија, тада се реалне шансе за успех ватрогасаца смањују. Зато током превентивне процене развоја пожара, или појаве експлозије, треба могући сценарио детаљно размотрити.

**Табела 2.2.:** Појава, развој и карактеристике опасних догађаја [Koinig 1999]:

Развој	Критеријуми	Начин решавања
Начин појављивања	Паљење Пожар Експлозија	Системи за детекцију
Начини одређивања опасности	Хемиски Физички Техничка сигурност Техничка заштита од пожара	Провера у документацији за дати случај Опис произвођача опреме Искуство
Начин ширења	Земља Вода Баздух	Мапе околине Водотокови Метеорологија
Радијус дејства	Пожарно оптерећење У ком агрегатном стању је Начин ослабања материје Време/ брзина сагоревања	Оцена начина ширења пожара Урбанистички услови Предвиђене табеле за дати случај
Околина	Топографија Насељеност Важни објекти	Испуњеност урбанистичких услова током градње Катестарски планови
Утицаји	На људе Екологију Инфраструктуру	Користити табеле предвиђене за дати случај

**Табела 2.3.:** Параметри и могући утицаји при ослобађању неке од опасних материја [Plev-Seliger, 2009]

	Одређене вредности	Параметри који утичу
Начин ослобађања	Цурење Брзина истицања Величина локве Брзина испаравања	Стварање локве Које је стање материје Нагло испаравања
Реакција опасних материја у односу на услове око опасног догађаја	Концентрација опасних материја	Извор Концентрација Врста околиша Ваздушне масе Метеоролошки услови Остали услови Отровност материје Запаљивост Могућност експлозије
Утицаји појава опасних материја	На људе  На околину	Насељеност Време боравка у близини Тип заштите Појава слојевите загађености



**Табела 2.4.:** Сценарио развоја пожара и експлозије после судара возила [Pleß-Seliger, 2009] :

Потенцијалана опасност	Материје које горе или експлодирају			
Тип догађаја	Пожар и експлозија			
Агрегатно стање материје	Чврсте материје	Течне	Течно-гасовите	Гасовите
Дејство	Пожар чврстих материја Експлозија прашине Експлозивни	Пожар у локви резервора Слободно зрачење током сагоревања	Сагоревање у облаку (лопти) Закаснило кључање Слободно зрачење-током сагоревања	Слободно зрачење-у фази флешовер Сагоревање гаса у облаку Пуцање посуде под притиском УВЦЕ ( <i>UVCE</i> ) сагоревање облака неиспарене течности ВЦЕ ( <i>VCE</i> ) сагоревање облака течности која је испарила

Сагледавање проблема урађено је на бази искуства [Koinig 1999]. Реално постоје само три групе ризика:

- Пожар,
- ослобађање опасних супстанци и
- експлозија.

#### 2.4. Сценарио догађаја

За процену штетног ризика у тунелима, развијене су специфичне методе, које су урађене на бази истраживачких експеримента, искуства, и реалних догађаја. Током процене основни проблем је био утицај великог броја параметара као што су [Georg -Ursula, 2009]:

- смањење ризика за људе и њихово брзо и безбедно евакуисање из опасне зоне,
- повећање изгледа за безбедну евакуацију из тунела коришћењем пожарних излаза, паничног светла, пожарних апарати и адекватне прве помоћи
- аутоматски системи за безбедну евакуацију контролом притиска на путевима (пресуризација), који би повећали шансе за евакуацију лица и

дали шансу ватрогацима за одржавање структуре тунела смањењем температуре,

- очување структуре објекта, као и смањење граничних вредности оптерћења на зидове, плафон и подлогу,
- побољшање техничке опреме тунела, посебно у односу на проветравање, контролу ширења топлоте од пожара и кретање токсичних гасова,

Експериментална истраживања су спроведена са различитим типовима возила. Студије су рађене као велики реални тестови и као експерименти рађени на умањеном моделу. .

Развој технике за тунеле условљава сложени сценарио ризика пожара и мора предвидети серију догађаја који су већином међународно усаглашени. Сценарио се користи да би се предвидели проблеми у постојећим и будућим тунелима за случај транспорта опасних материја. На бази квантитативне анализе ризика, током пројектовања, добила би се оцена величине ризика [ITIG, 2006] Такозвани АЛАРП принцип (*ARLAP – As Low As Reasonably Particible*) описује ризик мултидисциплинарно сагледан са свих страна (социјални, индивидуални, окружење, имовина). Принцип АЛАРП разликује три категорије [Georg -Ursula, 2009] ризика:

- Категорија занемарљивог ризика подразумева идеју да се ризик максимално смањи улагањима у техничка решења, што није увек економски и технички изводљиво.
- Категорија подношљивог ризика. У овој категорији, ризик може бити ублажен у мери прихватљивог, у функцији повећања трошкова технике за тунеле до разумне границе.
- Категорија неподношљивог ризика са минималним улагањем.

Увек треба да буде циљ да се достигне област бар подношљивог, односно прихватљивог ризика.

Да би се постигла квантитативна процена ризика (*QRA*) за саобраћајне тунеле [OECD, 2001] предлаже 13 различитих сценарија (табела 2.5.).

Табела 2.5.: Различити предложени сценарији [OECD, 2001]

Сценарио	Опис	Количина	Величина локве( mm)	Брзина сагоревања(kg/s)
1	Пожар камиона 20 MW (чврсте, запаљиве)	-	-	-
2	Пожар камиона 100 MW (чврсте, запаљиве)	-	-	-
3	Облак и ТНГ гасови Течни гас , боца	50 kg	-	-
4	Погонско гориво у гасном стању (пожар резервоара)	28 t	100	20,6
5	ВЦЕ пожр Течност и гас	28 t	100	20,6
6	Ослобађање хлора Течност, гас	18 t	50	45
7	Сагоревање у облаку (лопти) резервоара ТНГ гас, течност	18 t	-	-
8	ВЦЕ резервоар ЛПГ гас, течност	18 t	50	36
9	Пламен изнад резервоара ТНГ гас	18 t	50	36
10	Ослобађање амонијака у облику гаса, течности токсичан, запаљив	20 t	50	36
11	Акролин цистерена Течан токсичан запаљив	25 t	100	24,8
12	Акролин у боци	100 l	4	0,02
13	Угљен диоксид у облаку Токсичан	20 t	-	-

Објашњење

Тип транспорта	Пожар нормалних гасова	Опасност од пожара и експлозије Течни гасови	Ослобађање токсичне материје	Физичко ослобађање	Пожарно опасне материје
----------------	------------------------	-------------------------------------------------	------------------------------	--------------------	-------------------------

Листа садржи два сценарија пожара за нормалне терете (1,2); Експлозивно ослобађање материја под притиском без пожара (13); Разматрана су два различита сценарија пожара (4,9); За случај експлозије су разматрана четири сценарија са ослобађањем токсичних једињења, такође кроз четири облика. Од (11) до (13) сценарија обрађени су транспортовани материјали са опасним садржајем.

На бази предложених сценарија могу се напавити следеће шеме за степенасту класификацију ризичних појава у тунелима [Pleß-Seliger, 2009]:

- нормални пожари (не декларисане робе),
- мале експлозије облака испарења уз ограничена издвајања токсичних материја,
- велики пожари запаљивих течности и експлозије облака испарења (закаснило и одложено паљење),
- ослобађање отровних гасова из течности и велика физичка експлозија облака испарења без паљења и утицаја отровних гасова (незапаљиви и нетоксични гасови),
- велика реакција течних испарења (БЛЕВЕ, ВЦЕ, сагоревање у облику ватрене лопте са великим исијавањем енергије зрачења).

Према АДР-у [ADR, 2011] (Европски споразум о међународном превозу опасних материја) сви тунели су морали да буду категоризовани до краја 2009. Ограничења су разматрана у односу на специфичности ризика, алтернативу, и контролу саобраћаја. Категорије ограничења транспорта опасних материја у тунелима могу се детаљније видети у АДР-у.

Веома је тешко да се постигне претпоставка о стварној учесталости могућих сценарија у пракси. Са једне стране најспектакуларнији догађаји су добро познати и обрађени из свих углова, са друге стране је веома мало информација на располагању о свим осталим мање спектакуларним догађајима.

На основу података вероватноће догађаја могуће је проценити и одредити различите ризике. Најзначајније је међутим дефинисати, код процене ризика у тунелу, сценарио развоја пожара за исто пожарно оптерећење и могућу упоредну вредност реакције. Немачки закон о безбедности обухвата и законе који се односе

на животну средину, закон о раду и закон о акциденту. Акциденти са бројним варијацијама [Wietfeldt, 2002] односе се на претпоставку о концепту ризика.

Дефиниција опасности има два битна елемента:

- појаву штете и заштита јавног реда и безбедности и
- вероватноћу настанка штете.

Ово јасно показује да термин високе опасности (ризика), показује вероватноћу појаве ризика, на основу чега се треба припремити да се предупреди појава догађаја. За решавање овог проблема, мора да се анализира ризик, а на основу сценарија и градације ризика да се предвиде потребне мере. Поред тога се морају елиминисати утицаји на људе у односу на физичке и психолошке ефекте, узимајући у обзир границе које се смеју достићи.

Појава ових догађаја довела је до покретања акције на нивоу европских држава да би се тунели заштитили од пожара и спречиле катастрофе. Тако се у Европи појавило неколико центара који су покушали да практичним тестовима и теоретским сагледавањима одреде смернице за контролу и техничко управљање ризицима пожара. Међу тим центрима предњачи државни институт БАМ у Берлину.

Током сагледавања проблематике, поједине лабораторије су одабрале одређене смерове истраживања:

- израда експерименталних тунела и експеримената у њима, и сагледавање развоја пожара
- теоретско сагледавање развоја пожара уз математичку симулацију
- стационарни системи за гашење пожара
- ватрогасна тактика током гашења пожара.

Основне идеје ових истраживања су биле:

- како изградити тунел
- која су могућа пожарна оптерећења у тунелу, у зависности од транспорта
- које се количине дима и отровних гасова могу појавити у току пожара
- колико може да издржи конструкција тунела

- какав је пренос пожара на друга возила у тунелу
- који је систем евакуације људи у тунелу
- који је систем контроле кретања димних гасова
- каква је могућност гашења таквих пожара и одржавања контролисане температуре
- какав је систем мобилне опреме потребан за гашење
- какав контролни центар за пожарне ризике мора да се инсталира у тунелу.

### 3. ТЕРМОДИНАМИКА ПОЖАРА У ТУНЕЛИМА

За детаљније упознавање са термодинамиком пожара, читалац се упућује на књиге: "Термодинамика неконтролисаног сагоревања" [Vidaković, 1998.], и "Пожар и архитектонски инжењеринг" [Vidaković-Vidaković, 2008].

#### 3.1. ПОЖАРНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ ВОЗИЛА У ТУНЕЛУ

##### Пожарно оптерећење

Под пожарним оптерећењем подразумева се количина топлоте свих горивих материјала који се налазе у једном тунелу, сведена на јединицу површине пода датог тунела [Vidaković-Vidaković, 2008]:

$$P_i = \frac{\rho_i V_i H_i}{S} \quad [3.1]$$

где је:

$P_i$  - пожарно оптерећење, у  $\text{kJ/m}^2$

$\rho_i$  - привидна густина материјала, у  $\text{kg/m}^3$

$V_i$  - запремина материје, у  $\text{m}^3$

$S$  - површина основе, у  $\text{m}^2$

$H_i$  - стварна топлотна моћ, у  $\text{kJ/kg}$

$i$  - индекс елементарне јединице.

Сви пожари укључују хемијске реакције између неког запаљивог материјала (горива) и кисеоника. Иако је "ватра" манифестација хемијске реакције, треба напоменути да начин сагоревања може више зависити од физичког стања и локације горива него од његове хемијске природе. На пример, гомила дрвених брикета ће горети знатно другачије него један балван исте тежине. Такође гомила брикета у углу просторије ће сагорети на другачији начин у односу на брикете слично сложене у центру просторије.

Материјали који сагоревају у пожару углавном долазе од возила која су запаљена. То укључују елементе возила као што су седишта, гуме, пластични материјали, гориво из резервоара возила (што износи више стотина литара за теретна возила), као и материјал који превози, што се пре свега односи на возила која преносе неку робу. Роба (пожарно оптерећење) може да буде разноврсна и може довести до различитих врста пожара. Неки начелни примери енергије сагоревања дати су у табели 3.1. [Pirac, 1999]:

**Табела 3.1.** Примери енергије сагоревања [Pirac, 1999]

Тип возила	Приближан садржај енергије [MJ]	Коментари
Приватна возила	3000-3900	Коришћено за тестове у Финској
Приватно возило	6000	Коришћено у ЕУРЕКА пожарном тесту
Пластично возило	7000	
Градски аутобус	41000	
Теретно возило	88000	
Цистерне са $50 m^3$ петрола	1500000	Претпоставка Холанђана за велике пожаре

Тестови у Рунехамар тунелу [Pleß-Seliger, 2009] су показали да чак и материјали који се не сматрају опасним могу да доведу до повећања енергије пожара. Тако се дошло до закључка да пожарно оптерећење има утицаја на пожар возила у тунелу. При пројектовања тунела потребно је одабрати пожарне карактеристике, које одговарају врсти саобраћаја тунела. Услови, као што је дозвола за превоз опасних материја, морају се узети у обзир.

### 3.2. БРЗИНА САГОРЕВАЊА

Масена брзина сагоревања -  $R(\text{kg/h})$

Линеарна брзина сагоревања -  $Rl(\text{m/h})$

1. Масена брзина сагоревања се користи током изградње објекта и прорачуна пожарне отпорности на температуру сваког елемента; упућује на начине превентивних акција, како би се температура ограничила у једном делу, или



читавом тунелу. У ватрогасној тактици масена брзина сагоревања даје смернице за изградњу тунела.

2. Линеарна брзина сагоревања, даје оријентационе прорачунске податке о могућој брзини преноса пожара у времену по запаљивим материјама у тунелу, или на отвореном. Линеарна брзина сагоревања даје податке о брзини ширења пожара, а на основу којих ватрогасна јединица може предвидети ширење фронта пожара у времену [Vidaković-Vidaković, 2008].

### **3.2.1. Масена брзина сагоревања**

На брзину сагоревања утиче низ фактора међу којима су најзначајнији:

1. врста материјала који гори
2. начин на који је материјал сложен
3. распоред материјала који гори, у тунелу
4. количина ваздуха који долази горућем материјалу
5. облик простора и облик зидова, плафона, отвора и подова
6. начин пролаза и рефлексије топлоте од зидова, који уоквирују простор где је избио пожар.

### **Масена брзина сагоревања при ограниченој количини ваздуха**

Ваздух у простору тунела улази кроз отворе. Сви простори пропуштају ваздух и у зависности од заптивености та је количина већа или мања. Заптивеност је сразмерна величини отвора, квалитету израде, површини зидова, разлици притисака око простора и разлици температуре у простору и спољне температуре ваздуха.

Како сагоревање зависи од количине ваздуха, то ће већа количина ваздуха који је ушао у тај простор проузроковати већу брзину сагоревања. Масена брзина сагоревања зависи и од потребне количине ваздуха за сагоревање неке материје. То значи, да постоји нека гранична вредност ваздуха који улази у простор, према потребном ваздуху за оксидацију горива. Ту зависност можемо овако дефинисати:

Масена брзина сагоревања ( $R$ ) при ограниченој количини ваздуха је у функцији количине ваздуха који улази у простор и минималне потребне количине ваздуха за сагоревање материје.

### 3.2.2. Масена брзина сагоревања за природно проветравање са ограниченом количином ваздуха:

$$R_1 = \frac{a u_m h' b}{L_{\min}} \quad [3.2]$$

где је:

$R_1$  - масена брзина сагоревања зависна од количине ваздуха који улази кроз отвор, у kg/min или kg/h

$u_m$  - средња брзина ваздуха који улази у тунел, у m/min или m/h

$h'$  - висина отвора до нулте линије у m

$L_{\min}$  - минимална количина ваздуха која је потребна да би сагорео 1 kg запаљиве материје m<sup>3</sup>/kg, [Reknagel-Sprenger, 1987]

$a$  - коеф. отпора и трења ваздуха на уласку кроз отвор у тунел (0,7)

$b$  - ширина отвора тунела у m

$$R_1 = \frac{a u_m h' b \text{ (vazduh koji ulazi u prostoriju )}}{L_{\min} \text{ (kolčina vazduha potrebna da izgori 1kg drveta )}}$$

Крајњи облик једначине масене брзине сагоревања износи:

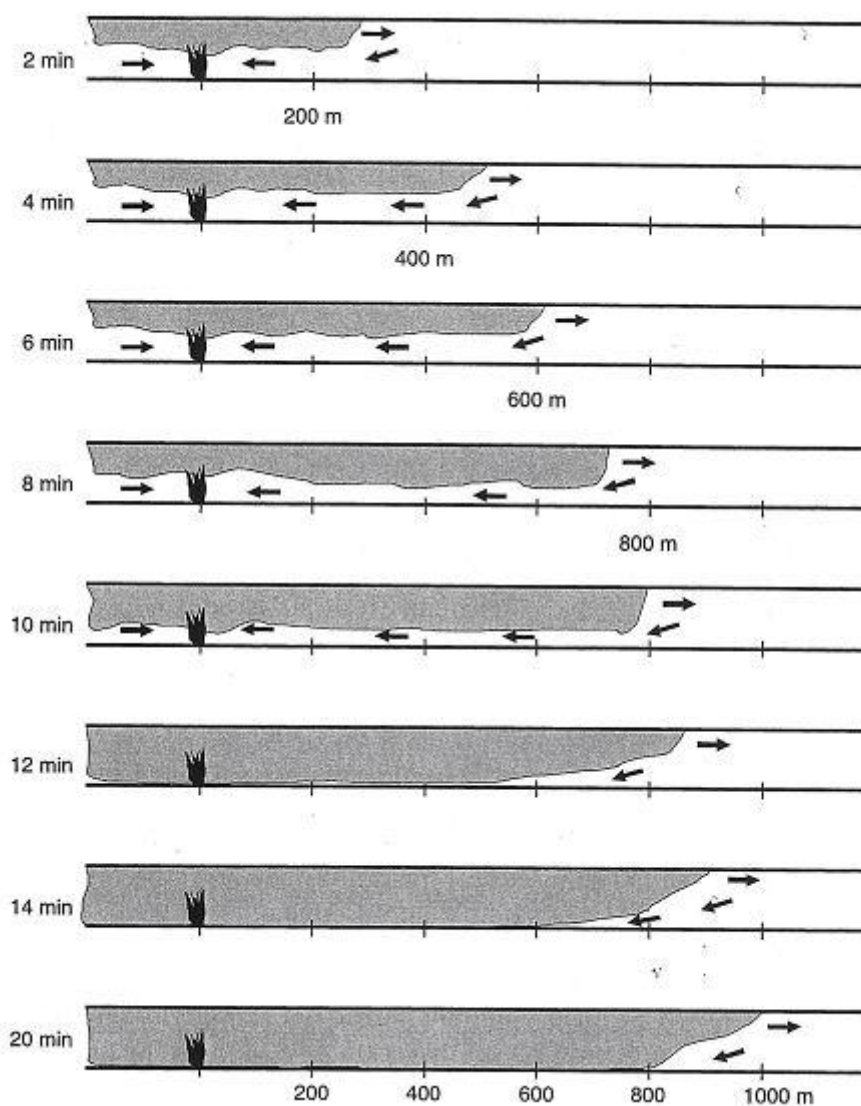
$$R_1 = X \sqrt{h} A_F, \text{ [kg/h ]} \quad [3.3]$$

где је:

$A_F$  - површина свих отвора на тунелу, [ m<sup>2</sup> ]

$h$  - висина отвора, у m

$X$  - хемијска константа за запаљиву материју



**Слика 3.1.** Улазак свежег ваздуха кроз отвор тунела природним путем [Beard–Carvel, 2005]

**3.2.3. Брзина сагоревања за принудно проветравање са ограниченом количином ваздуха:**

$$R_2 = \frac{au_n A_{Re}}{L_{\min}} = \frac{aL_v S}{L_{\min}}, \text{ [kg/h ]} \quad [3.4]$$

где је:

$L_v$  - количина ваздуха убаченог у тунел принудним проветравањем, у  $m^3/m^2h$

$S$  - површина под пожаром, у  $m^2$

$a$  - коефицијент отпора и трења (0,7)

$u_n$  - брзина ваздуха код механичког проветравања створена вентилаторима, у  $m/h$

$A_{Re}$  - пресек отвора за улазак ваздуха, у  $m^2$

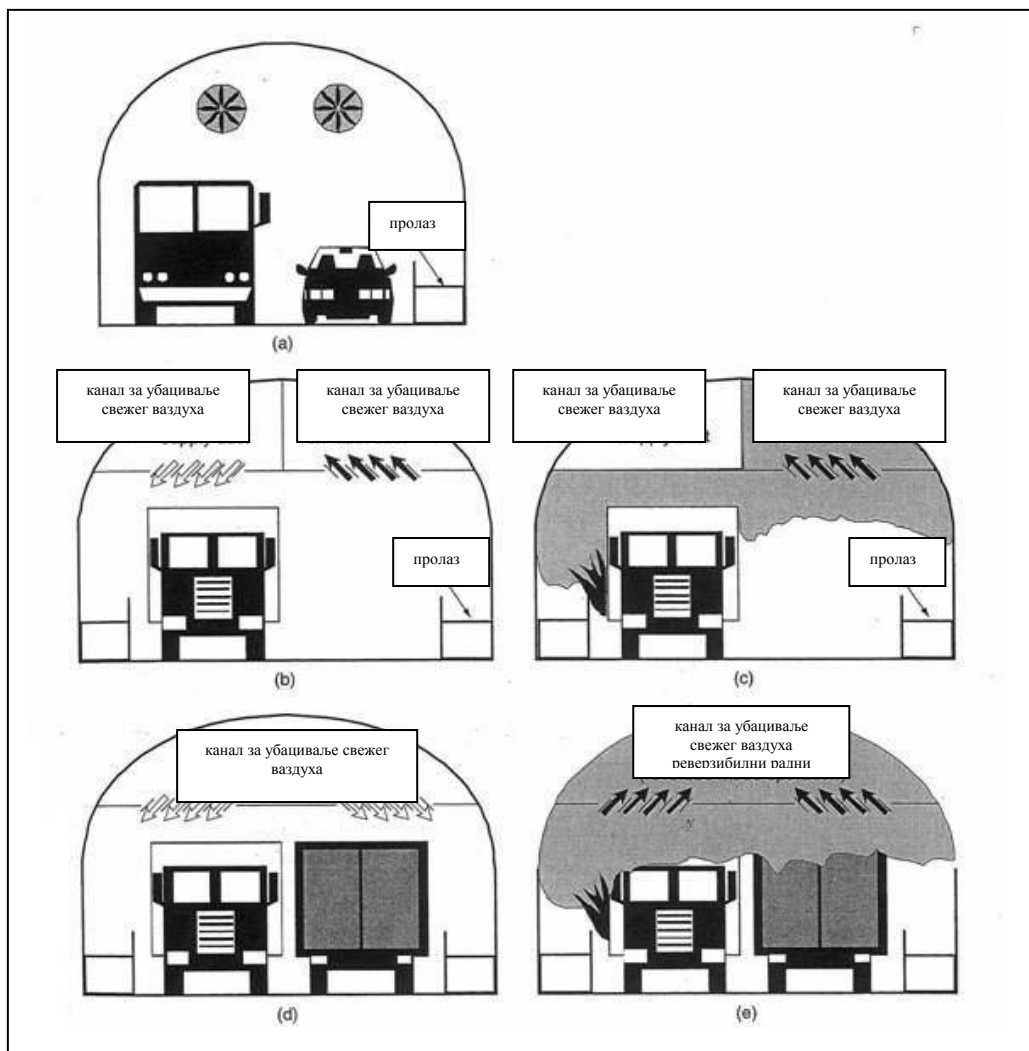
$L_{min}$  - минимална количина ваздуха потребна за сагоревања, запаљиве материје у тунелу  $m^3/kg$

Када једначине [3.3] и [3.4] саберемо, за случај природног и принудног проветравања добијамо:

$$R_1 + R_2 = R = X \sqrt{h} A_F + \frac{u_n a A_{Re}}{L_{min}}, \quad [kg/h] \quad [3.5]$$

### 3.2.4. Брзина сагоревања у тунелима и утицај различитих врста вентилације

Тунели су са две стране отворене цеви, које се обично природно проветравају или преко посебних вентилационих система. Поред природне вентилације у тунелима може да се појави ефекат клипа, односно струјањ ваздуха услед кретања возила. Системи принудне вентилације служе да одводе загађени ваздух створен издувним гасовима. Да би се у случају неког догађаја одговорило у кратком временском року, принудна вентилација треба да, у уздужним модулима тунела оствари минималну брзину ваздуха од  $1 m/s$ . Тако ће се остварити у тунелу најмање четири измене ваздуха на сат [РАБТ, 2006]. У случају пожара потребно је да су обезбеђене брзине, према РАБТ-у и по препоруци од  $1,5 m/s$ , односно  $2,3 - 3,6 m/s$



Слика 3.2 Једна од верзија брзине сагоревања са ограниченом количином ваздуха, уз додатни убачен ваздух принудним проветравањем за тунел [Beard–Carvel, 2005]

Са протоком ваздуха кроз тунел долази и константна количина кисеоника која је на располагању током пожара за процес сагоревања. Наравно, јасно је да је са повећањем утврђене брзине протока по секцији тунела у свакој тачки површине попречног пресека дефинисан масени проток кисеоника који је на располагању и који одређује ослобођену енергију у случају пожара. Ако ми израчунамо масу тока кисеоника у ваздуху, коју имамо на располагању на било којој површини попречног пресека тунела, онда је могуће одредити максималну могућу енергију пожара  $XPP$  ( $HRR$  – *Heat release rate*). То је одређено од стране Торнтона [Thornton, 1917], и често је касније потврђено да је створена енергија, током

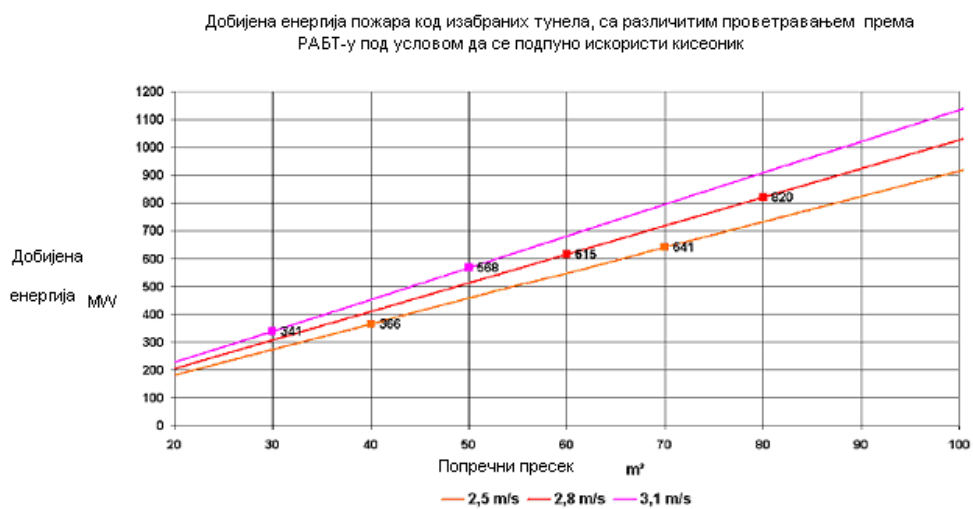
сагоревања органских супстанци са потрошњом од 1 kg кисеоника, 13,1MJ. Претходно идентификован ХРР у тунелима, показује да пожар са смањеном количином ваздуха прелази у фазу тињања.



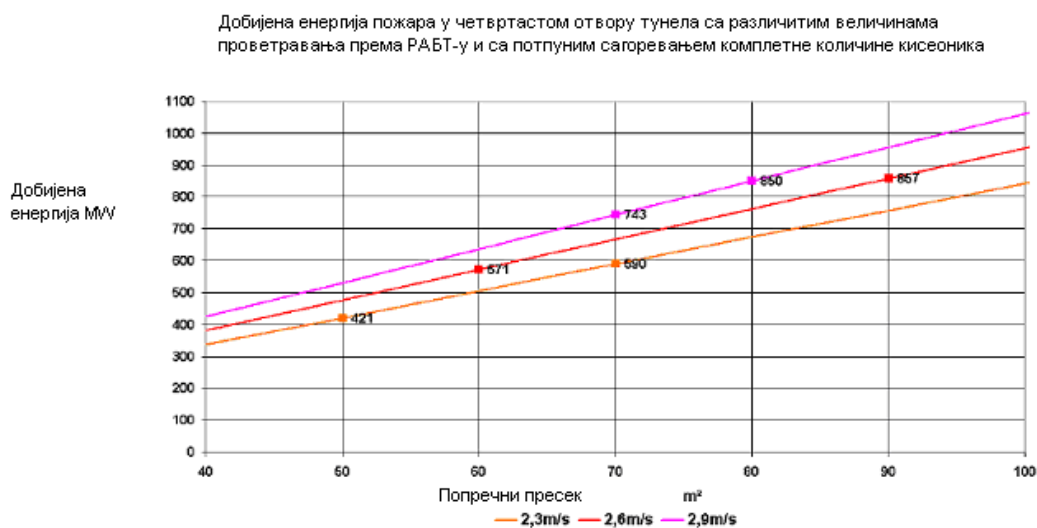
**Слика 3.3.** Развој пожара у тунелу у функцији количине ваздуха [Pleß-Seliger, 2009].

Слика 3.3. показује да је код потпуног сагоревања при брзини ваздуха од 1 m/s по површини попречног пресека тунела од 50 метара, постигнут проток који је остварио енергију пожара од 200 MW. Под претпоставком да је на располагању само 75% ваздуха по већем попречном пресеку, од 68 m<sup>2</sup> добија се иста енергија пожара од 200 MW.

Слике 3.4. и 3.5. показују да ваздух који је на располагању, у току проветравања, значајно утиче на енергију пожара. У стварном пожару на енергију пожара такође утиче и распоред материјала, који се налази растуран по тунелу (аутомобили). Прелазак пожара са једног аутомобила на други зависи од бројних фактора и док се то не деси имамо пад енергије пожара.



Слика 3.4. Могући развој енергије пожара за кружни пресек тунела са проветравањем, према РАБТ-у [Pleß-Seliger, 2009].



Слика 3.5. Могући развој енергије пожара за четвртасти пресек тунела са проветравањем, према РАБТ-у [Pleß-Seliger, 2009].

У случају пожара на отвореном, брзина сагоревања не зависи од количине кисеоника него само од пожарног оптрећења. док у затвореном простору део

испарења односно формирана гасовита једињења неће да сагоре јер нема довољно кисеоника (сагоревање са ограниченом количином ваздуха).

Одговарајућим распоредом вентилационих отвора за убацивање свежег ватдуха и отвора за одимљавање, те правилним избором радних режима могуће је обезбедити услове, за безбедну евакуацију људи из ватром захваћеног простора. За правилно пројектовање ових система, осим познавња динамике сагоревања појединих материјала, количине топлоте и дима који при њиховом сагоревању настају, потребно је доћи до података о могућим сценаријима ширења пожара, односно променама поља температуре и брзине, поља концентрација појединих материја у ваздуху, тј. кретању дима који том приликом настаје, а при различитим режимима рада ових система.

У нормалним радним условима, за вентилацију тунела предвиђа се природно проветравање, или по потреби, уколико дође до прекорачења концентрације издувних гасова у ваздуху, евентуално принудно проветравање. Посебан режим рада је предвиђен у случају појаве пожара у простору тунела.

Вентилација тунела је важна и има активн утицаја на опасне ситуације, Као што је већ споменуто сагоревање у тунелу зависи од вентилације То значи да се унутар зоне сагоревања стварају услови да температура развијеног пожара може достићи 1000 °C . Основни циљеви вентилације су [Pleß-Seliger, 2009].

- Дим у фази пловности одвести из тунела природним путем
- Контролисати ширење дима убаченим ваздухом
- Вруће гасове што пре одвести из објекта и тиме заштити објекат од акумулације топлоте
- Обезбедити евакуацију и бежање људи из тунела
- Омогућити дејство ватрогасних јединица контролом концентрације дима

Као резултат убацивања свежег ваздуха, посебно у фази развоја пожара, долази до хлађења димних гасова током мешања са ваздухом и престанка пловности дима. У фази пловности дима, када је дим више температуре од околине он као



конзистентан може се лако одвести из тунела отворима на врху тунела. Мешањем ваздуха и дима долази скоро до путпуног задимљавања простора, тако да су људи у опасности и упућени на евакуацију у правцу пристизања свежег ваздуха

У РАБТ –у [РАБТ, 2006] дате су и друге могућности кретања свежег ваздуха. тако да су тунели опремљени са једним или више канала у зависности од типа тунела. Код попречног вођења ваздуха канали су постављени дужином тунела у доњем делу са стране у близини пролаза возила. Одсис ваздуха је вођен преко плафона до изласка из тунела.

Ваздух и дим током пожара могу се такође одвести и преко отвора на плафону са пожарно отпорним каналом. Код попречног проветравања тунела свежим ваздухом канал се налази испод површине газишта тунела читавом дужином, тако да се ваздух уводи у нивоу пода. Отвори на плафону су постављени дужином тунела. Овако предвиђена контрола кретања дима може обезбедити одвођење дима у фази пловности и на деоници тунела где је пожар настао, без ширења дима по дужини тунела. Код кружног профила тунела економски је користити систем само за дуге тунеле [Pleß-Seliger, 2009].

Сви вентилациони системи, чак и ови који су предходно поменути, у стварним пожарима показали су недовољно ефикасни за контролу дима, што су показале анализе после великих пожара Ванигера и Харта [Waninger–Harth, 2004].

Посебна пажња у истраживањима била је усмерена и на изучавање процеса тзв. нестабилног (пулсирајућег) сагоревања. Оваква врста сагоревања јавља се при ограниченој количини ваздуха, као главном фактору, а то даље има утицаја на остале процесе. Такође, велика пажња је посвећена феномену повратног тока димних гасова („*backlayaring*“), тј. одређивању тзв. критичне брзине струјања ваздуха (види глави 4. Преглед досадашњих истраживања).

### 3.3 ВРЕМЕ ТРАЈАЊА ПОЖАРА

Пожар се развија у три главне фазе. Прва фаза је паљење, друга горење и трећа хлађење. Све те три фазе заједно дају време трајања једног пожара. [Vidaković-Vidaković, 2008].

- Прва фаза развоја пожара

Прва фаза паљења од спољашњег извора паљења је најкраћа и њено време трајања обично је, према дужини осталих временских фаза, мало и временски недефинисано

- Друга фаза развоја пожара

У другој фази пожар се развија и температура расте. Трајање било ког пожара у другој фази може да се одреди у зависности од количине запаљиве материје по површини и брзине њеног сагоревања.

$$\tau = P_i \frac{S}{R} \quad [3.6]$$

где је:

$\tau$  - трајање пожара, у h

$P_i$  - пожарно оптерећење, у  $\text{kg/m}^2$

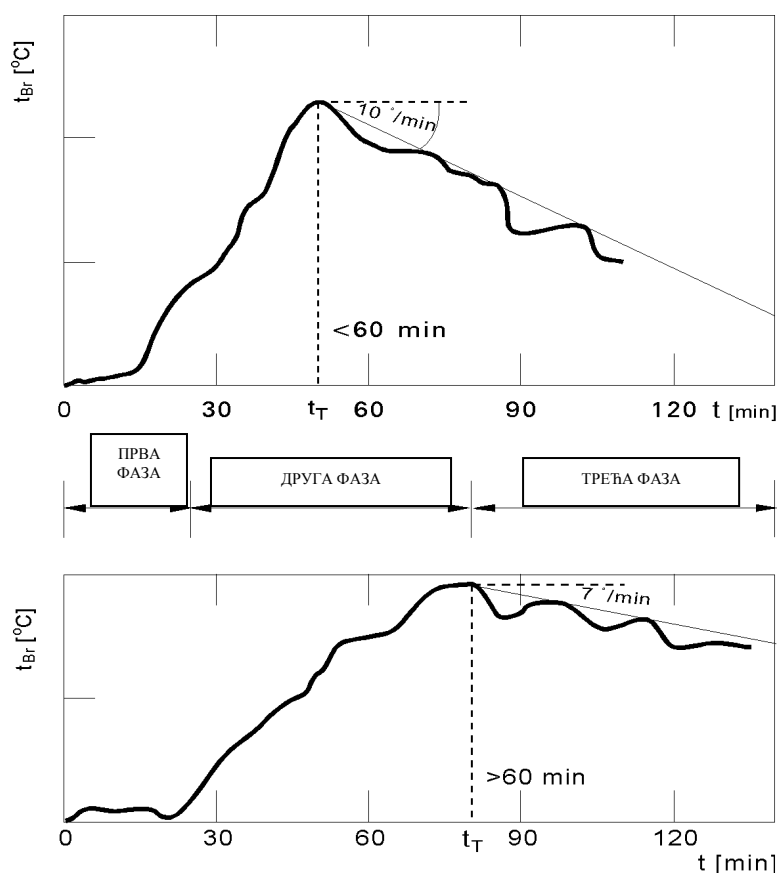
$R$  – масена брзина сагоревања, у  $\text{kg/h}$

$S$  - површина пода тунела под пожаром, у  $\text{m}^2$

- Трећа фаза развоја пожара

Трећа фаза почиње кад пожар достигне време  $\tau_T$  (максимална температура). У том тренутку је читава горива материја запаљена што доводи до полаганог смањења одавања топлоте и до опадања температуре. На основу експеримената дошло се до закључка да тангента на температурну криву заузима већи или мањи угао са апсцисом у зависности од друге фазе и времена ( $\tau_T$ ). Брзина опадања

температуре под углом од  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  постиже се ако је време  $\tau_T$  мање од  $60\text{ min}$ . У случају да време раста температуре до максималне вредности  $\tau_T$  пређе  $60\text{ min}$ , температура опада под углом од  $7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Ова температурна крива дата је на слици 3.6, у зависности од појединих фаза развоја пожара.



**Слика 3.6.** Начин опадања температуре и угао опадања у трећој фази развоја пожара [Vidaković-Vidaković, 2008].

Наравно, овакво упрошћено сагледавање треће фазе крије у себи грешку. Апроксимативно гледано, може се у великом броју случајева прихватити овакав упрошћен прилаз кретању температуре у трећој фази, што олакшава примену приликом прорачуна. Бројни експерименти, обављени са циљем контроле опадања температуре у трећој фази потврдили су да, уз опрезност појаве могућих одступања, оваква трећа фаза може да се примењује у пракси.

То значи да пожари који дуже трају, преко  $60\text{ min}$ , имају времена да вишак топлоте предају околним зидовима просторије, па је њихово опадање температуре спорије

захваљујући повратној топлоти из зидова. Насупрот томе, пожари краћи од 60 min добијају се већим факторима прилива ваздуха природним путем  $A_F(h)l/2$ , а самим тим већом брзином сагоревања, што у крајњој линији доводи до виших максималних температура. Њихово опадање температуре је краће, јер су делови објекта, који су били изложени пламену, краће били под утицајем високе температуре и акумулације топлоте. Ово је врло битно за грађевинаре који треба да одреде врсту конструкције у односу на могуће време трајања пожара.

Пожарно оптерећење  $P_i$ , које директно утиче на време трајања пожара, може се регулисати одабирањем материјала у аутомобилској индустрији или стриктним ограничавањем уласка у тунел возила са опасним теретима.

### 3.4. БИЛАНС ЕНЕРГИЈЕ ПОЖАРА У ТУНЕЛУ

#### 3.4.1. Развијена температура пожара

Температура је у функцији већег броја фактора. Да би се одредила промена температуре у јединици времена, мора се почети од биланса топлотног флукса за један тунел. Биланс топлотног флукса односи се на суму топлотног флукса који је ослобођен сагоревањем и топлотног флукса предатог околини [Vidaković-Vidaković, 2008].

$$Q_R = Q_F + Q_W + Q_g + Q_L \quad [3.7]$$

где је:

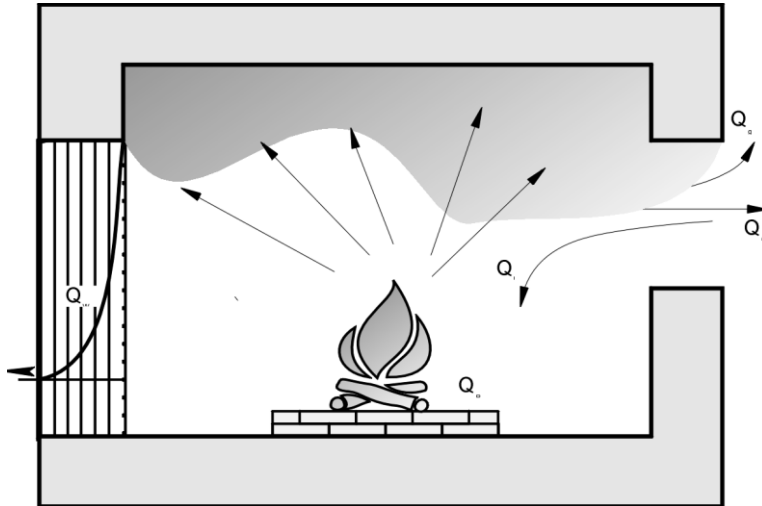
$Q_R$  - ослобођени топлотни флукс сагоревањем, у kJ/h

$Q_F$  - део одатог топлотног флукса зрачењем кроз отворе тунела, у kJ/h

$Q_W$  - део одатог топлотног флукса на загревање зидова тунела, у kJ/h

$Q_g$  - део одатог топлотног флукса одведеног гасовима, у kJ/h

$Q_L$  - део одатог топлотног флуksа одатог ваздуху током принудног проветравања, у kJ/h.



Слика 3.7. Биланс енергије за четвртаси пресек тунела [Vidaković-Vidaković, 2008].

### 3.4.2. Ослобођена енергија у тунелу који је у пожару:

Стопа ослобађеног топлотног флуksа ( $Q_R$ ), опште позната као ХРР (*HRR – Heat release rate*) је једна од најважнијих променљивих која карактерише пожар у тунелу.

$$Q_R = R \cdot H_i, \text{ [kJ/h]} \quad [3.8]$$

$$Q_R = X \sqrt{h} A_F H_i, \text{ [kJ/h]} \quad [3.9]$$

$R$  - масена брзина сагоревања [kJ/h]

$H_i$  – топлотна моћ [kJ/h]

$X$  – константа за хемисјке параметре пожарног оптерећења

Константа  $X$  је израчуната за запаљиву материју, за случај потпуног сагоревања одређене количине сагоривог материјала [Reknagel-Sprenger, 1987]

Петерсон [Pettersson, 1977] је поставио тада неколико услова које је потребно испунити да би се једначина [3.8] могла примењивати:

1. пожар мора бити вентилационо регулисан (брзина сагоревања са ограниченом количином ваздуха) односно зависан од дотока ваздуха у просторију
2. да је пожарно оптерећење такво да параметри сагоревања ( $X$ ) остану константни, а то значи да под претходним условима омогући константно сагоревање
3. једначина је најтачнија за течне запаљиве супстанце код којих при сагоревању није изражена фаза хлађења и
4. ако се тражи специфична одата енергија по  $m^2$  просторије, онда се једначина [3.8] дели са површином просторије  $S$

$$q_R = \frac{R}{S} H_i, [\text{kJ/hm}^2] \quad [3.10]$$

### 3.4.3. Одата енергија кроз отворе

$$q_F = \frac{A_F}{S} (E_{Br} - E_0), \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{hm}^2} \right] \quad [3.11]$$

$A_F$  – површина отвора, у  $m^2$

$E_{Br}$  - зрачење емитовано од ватре, у  $\text{kJ/m}^2\text{h}$

$E_0$  – почетно зрачење, у  $\text{kJ/m}^2\text{h}$

$S$  - површина основе, у  $m^2$

### 3.4.4. Одата енергија на зидове

Углавном, сви истраживачи користили су полазиште за специфични пренос топлоте на основу Њутновог закона:

$$q_w = \alpha_{rez} (t_{br} - t_w) [\text{kJ/m}^2\text{h}] \quad [3.12]$$

$\alpha_{rez}$  - Коэффициент прелаза топлоте, у  $\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

$t_w$  - температура зида, у  $^\circ\text{C}$

$t_{br}$  – температура пожара, у  $^\circ\text{C}$

Да би се проблем лакше обрадио овај коефицијент преноса топлоте подељен је на два дела: на конвективни део  $q_k$  и део створен радијацијом  $q_R$ :

$$q_w = q_k + q_R \quad [3.13]$$

Као што се види, прелаз топлоте која се преноси на зид подељен је на конвективну топлоту и на топлоту која зрачењем пламена доспева до зидова. Конвективни коефицијент добија се струјањем гасова природним путем или принудним путем преко површине зидова. Овај прелазак топлоте зависи од хлапавости зида и од брзине струјања гасова преко зида:

$$q_k = f(R_e, P_r, G_r, L) \quad [3.14]$$

Коефицијент зрачења зависи од зрачења између зидова и пламена и опет зидова, као и зидова међу собом. Због тога је коефицијент емисионог односа ( $\varepsilon_w$ ) врло компликовано тачно одредити.

$$q_R = \varepsilon_w C_C \beta f(t_{br}, t_w) \quad [3.15]$$

где је коефицијент  $\beta$  помоћна вредност и износи:

$$\beta = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \quad [3.16]$$

$T_1$  – температура у (К) на крају пожара

$T_2$  - температура у (К) на почетку пожара

### 3.4.5. Укупан прелаз топлоте на зид:

Кад се једначине за зрачење и конвекцију [3.14] и [3.15] саберу, добија се крајња једначина прелаза топлоте на зид тунела. Она, иако није савршена у погледу обухватности дешавања прелаза топлоте у једном пожару, у потпуности задовољава и даје могућности да се пожар прати, како експериментално, тако и математички:

$$Q_w = Q_R + Q_K = A_w(E_{br} - E_w) + A_w\alpha_k(t_{br} - t_w), [\text{kJ/h}] \quad [3.17]$$

$Q_R$  - топлотни флуks од зрачења пламена kJ/h

$Q_K$  - топлотни флуks од конвекције kJ/h

$A_w$  - површина зида, у  $\text{m}^2$

$E_{br}$  - зрачење емитовано од ватре, у  $\text{kJ/m}^2\text{h}$

$E_w$  - почетна зрачење, у  $\text{kJ/m}^2\text{h}$

$\alpha_{rez}$  - Коефицијент преноса топлоте на зид, у  $\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

$t_w$  - температура зида, у  $^\circ\text{C}$

$t_{br}$  - температура пожара, у  $^\circ\text{C}$

### 3.4.6. Специфична одата енергија гасовима:

Како је топао гас лакши од хладног ваздуха то долази у просторији до сталне измене гаса, с тим да топао ваздух, услед разлике притиска, излази из просторије и односи са собом топлоту. Специфични топлотни флуks одат гасовима је следећи:

$$q_G = \frac{GC_{pg}R(t_{Br} - t_0)}{S} [\text{kJ/m}^2\text{h}] \quad [3.18]$$



$G$  - запремина гаса, у  $\text{Nm}^3/\text{kg}$

$C_{pg}$  - специф. запреминска топлота гаса за константни притисак, у  $\text{kJ}/\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$

$R$  - масена брзина сагоревања, у  $\text{kg}/\text{h}$

$t_0$  – спољна температура, у  $^\circ\text{C}$

$t_{Br}$  – температура пожара, у  $^\circ\text{C}$

$S$  - површина основе, у  $\text{m}^2$

Запремина гаса може се одредити према хемијском саставу. [Reknagel-Sprenger, 1987]:

$$G = nL_{\min} + 5,60h + 0,7O + 1,245W [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

Ако се замене вредности за пожарно оптерећење од дрвета према Рекнагелу [Reknagel-Sprenger, 1987] добија се следећа једначина:

$$G = 1 \cdot 3,98 + 5,6 \cdot 0,05 + 0,7 \cdot 0,38 + 1,245 \cdot 0,27 = 4,9, [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad [3.19]$$

Тада је количина гаса који се ствара у пожару:

$$G_v = GR = G(R_1 + R_2) [\text{m}^3/\text{h}] \quad [3.20]$$

Где је:

$G$  - запремина гаса, у  $\text{Nm}^3/\text{kg}$

$R_1$  - масена брзина сагоревања природним путем, у  $\text{kg}/\text{h}$

$R_2$  - масена брзина сагоревања принудним путем у  $\text{kg}/\text{h}$

Количина гаса зависи од потребне количине ваздуха за сагоревање, односно од материје која сагорева. Однос количине гаса и ваздуха који је ушао у простор (пример је дат за дрво које сагорева на камиону у тунелу  $330 \text{ h}^{1/2}$ ):

$$G/L_{\min} = 4,9/3,98 = 1,23[\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad [3.21]$$

Количина гаса је увек већа од количине ваздуха који је ушао у простор, иако је количина гаса у зависности од количине ваздуха.

За различите хемијске саставе пожарних оптерећења, који се могу наћи у тунелу од аутомобила до камиона и цистерни, треба накнадно одредити запремине гасова.

#### 3.4.7. Одата енергија на загревање ваздуха који улази у тунел:

$$Q_L = G_L C_{PL} R_1 (t_{Br} - t_L) [\text{kJ/h}] \quad [3.22]$$

$Q_L$  – количина топлотног флуksа пожара утрошена на загревање ваздуха, у kJ/h

$R_1$  - брзина сагоревања од ваздуха који је ушао кроз отворе, у m/h

$C_{PL}$  – специф. топлота ушлог ваздуха за константни притисак, у kJ/Nm<sup>3</sup>°C

$G_L$  - запремина ваздуха, у Nm<sup>3</sup>/kg

$t_L$  – температура спољног ваздуха, у °C

$t_{Br}$  – температура пожара, у °C

#### 3.4.8. Биланс топлоте

Укупан биланс топлоте за једну просторију под пожаром добија се из суме ослобођеног топлотног флуksа и одатог топлотног флуksа:

$$RH_i = A_w (E_{Br} - E_w) + A_w \alpha_k (t_{Br} - t_w) + A_F (E_{Br} - E_0) + Q_L + Q_G \quad [3.23]$$

Ако се једначина [3.23] подели са  $A_w$ , добија се:

$$\frac{RH_i}{A_w} = \frac{G_g}{A_w} C_{pg} R(t_{Br} - t_0) + \frac{G_L}{A_w} C_{pL} R_L(t_{Br} - t_L) + (E_{Br} - E_w) + \alpha_k(t_{Br} - t_w) + \frac{A_F}{A_w} (E_{Br} - E_0) \quad [3.24]$$

где је  $A_w$  - површина свих зидова тунела, у  $m^2$

Брзина сагоревања  $R = R_1 + R_2$  у једначини биланса топлоте, за запаљену просторију, мења свој удео у зависности како улази ваздух потребан за сагоревање.

У случају да је  $R_1 = 0$ , значи да нема природног уласка ваздуха у тунел., Овај се случај десио у Турској када је улаз у тунел због пожара био зазидан, односно запечаћен са обе стране.

У случају да је  $R_2 = 0$ , значи да је проветравање искључено или да не постоји, па се тада тај део једначине не узима у обзир.

$$A_w(E_{Br} - E_w) + A_w \alpha_k(t_{Br} - t_w) = A_w \lambda \frac{dt}{dx} \quad [3.25]$$

Једначина [3.17] представља одату топлотни флуks на зид зрачењем и конвекцијом, која је једнака провођењу топлоте кроз зид тунела:

$$(E_{Br} - E_w) + \alpha_k(t_{Br} - t_w) = \lambda \frac{dt}{dx} \quad [3.26]$$

где је:

$\lambda$  □ - коефицијент провођења топлоте, у  $kJ/mh^\circ C$ .

Помоћу ове две последње једначине [3.24] и [3.26], може се математички израчунати развијена температура у пожару. Ове две једначине, које су у овом облику први пут написане седамдесетих година, најважније су приликом израчунавања утицаја пожара, утицаја проветравања и свих осталих термодинамичких кретања у просторији. Решавањем ових једначина може се у основи одговорити на питање: какав утицај има проветравање и да ли га треба оставити да ради или мора бити искључено. Поред тога, обрађивањем ових једначина на рачунару, добиће се одговор на питање: колико проветравање има утицај у самом билансу енергије.

Као што ће се видети, неопходно је да проветравање ради у време трајања пожара, не да би се спустила температура, како се у једном тренутку погрешно тежило,

већ да би се таквим проветравањем омогућила контрола кретања гасова и омогућила безбедна евакуација људи уз ефикасно дејство ватрогасних јединица..

### 3.4.9. Утицај оптерећења пожара на температуру у јединици времена

Познавајући другу и трећу фазу развоја пожара у једној просторији, као и димензије просторије са факторима природног и принудног дотока ваздуха у тунелу, може се израчунати време трајања пожара.

Када се оптерећење пожара повећа (више аутомобила или камиона са опасним теретима), примећује се да је пожар постао временски дужи. Из једначине [3.27] види се да је време трајања пожара друге фазе директно зависно од величине пожарног оптерећења:

$$\tau = P_i \frac{S}{R_1 + R_2}, [\text{h}] \quad [3.27]$$

У прописима велику улогу игра пожарно оптерећење  $P_i$ . Разлог томе је повећање времена трајања и дата могућност код нестационарног провођења топлоте у пожару да се што више топлоте акумулира у зидовима. По прописима носећа конструкција тунела, током пожара, не сме да падне испод минималне носиве вредности, како у времену загревања тако и времену хлађења.

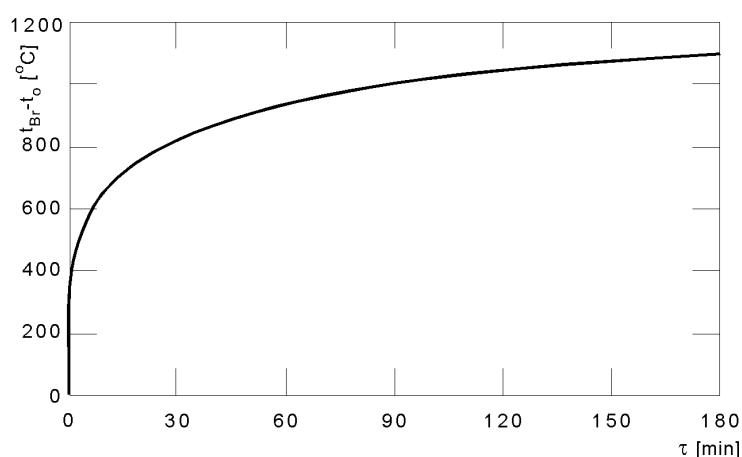
У претходним тачкама констатовано је да продужење трајања пожара, са малом брзином сагоревања ( $R$ ) или већим пожарним оптерећењем ( $P_i$ ), лоше утиче на носеће конструкције, а исто тако и на све грађевинске делове, међу којима и на елементе за вентилацију и климатизацију.

Сваки од ових елемената мора добити свој дијаграм понашања у пожару. Тако су настале категорије отпорности према пожару за поједине грађевинске елементе. У нас су пожарне категорије за неке грађевинске елементе стандардизоване.

Оне су одређиване према времену сигурне издржљивости једног грађевинског елемента у хипотетичном пожару. Колико времена одређени грађевински елемент треба да издржи у пожару зависи од тога где се налази и колика му је важност у односу на грађевинску конструкцију објекта.

Да би се један грађевински елемент испитао у грађевинским условима, било је потребно направити један јединствени систем за све елементе са једнообразном променом температуре у функцији времена.

Тако је настала јединствена температурна крива (3.8):



Слика 3.8. Јединствена температурна крива [Vidaković-Vidaković, 2008].

### 3.4.10. Линеарна брзина сагоревања

Овај део обухвата ширење пожара по чврстом материјалу у функцији линеарне брзине сагоревања како у правцу ветра, тако и насупрот њему. Једначине су изведене уз коришћење упрошћења, са циљем илустрације улоге променљивих физичких и хемијских величина. Учињен је такође покушај одређивања граница могућих примена. Термин површинско сагоревање, дат је у циљу разликовања линеарне брзине сагоревања ( $R_L$ ) и брзине пораста површине пожара ( $R_p$ ) од масене брзине сагоревања ( $R_1 + R_2$ ) из претходних глава. Показало се да је линеарна брзина сагоревања у неким случајевима битан параметар који надопуњује сагледавања масених сагоревања. Линеарна брзина сагоревања показује правац и брзину померања фронта пожара. Истина и код ње су битни фактори термодинамике

сагоревања, пораст температуре, количина ваздуха и време, али најбитније је одредити померање фронта пожара у времену. Код масене брзине сагоревања је најбитније одредити промену температуре у времену. [Vidaković-Vidaković, 2008].

Полазна једначина подразумева функцију преноса топлотне енергије  $q''$  пожара на незагрејану материју и раст њене почетне температуре околине  $t_0$  до температуре паљења  $t_p$ , за јединицу површине у времену. Ова топлотна енергија је једнака промени енталпије по јединици површине материје у времену, с' обзиром на линеарну брзину сагоревања. Ако се усвоји да су услови константни, тада је:

$$\rho R_L \Delta i = q'' \left[ \text{kg/m}^3 \text{m/hkJ/kg} \right] = \left[ \text{kJ/hm}^2 \right] \quad [3.28]$$

где је:

$q''$  – развијена топлота по  $kg$  гориве материје, у  $\text{kJ/hm}^2$

$\rho$  - густина гориве материје,  $\text{kg/m}^3$

$R_L$  – линеарна брзина ширења сагоревања, у  $\text{m/h}$

$\Delta i$  – енталпија – промена садржаја топлоте по јединици масе

Температура испаравања представља температуру површине чврсте или течне материје, која ће обезбедити прелазак довољне количине гориве материје у парну фазу за почетно паљење. Температура паљења ( $t_p$ ) је нижа од температуре кључања ( $t_{ključ}$ ) за течности, док за чврсте материје зависи од њене хемијске кинетике. Претпоставља се да фаза загревања течне фазе до температуре паљења, обично има својства константно хомогених средина, па се зато може написати:

$$\Delta i = c_p (t_p - t_0) \left[ \text{kJ/kg} \right] \quad [3.29]$$

где је:

$c_p$  - специфична топлота пироллизе течности или чврсте материје, у  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$

$t_p$  – температура паљења гаса, у  $^\circ\text{C}$

$t_0$  – температура површине материје, у  $^\circ\text{C}$

Тако је формулисана линеарна брзина сагоревања  $R_L$ .

Интересантно је да ће се за дати топлотни флуks  $R_L$  повећати са опадањем густине горива и то без обзира на смањивање разлике температура  $t_0$  и  $t_p$ . Чврста материја мале густине може да представља потенцијални ризик услед повећања линеарне брзине сагоревања. Такође, уколико се температура околине  $t_0$  повећа конвекцијом и радијацијом топлоте, тада ће линеарна брзина сагоревања сукцесивно расти.

### 3.4.11. Ослобађање и одавање топлоте

Сагоревање материјала развија топлоту која се преноси, пре свега, на загревање незапаљених делова материјала, као и на околину. Укупна количина топлоте, која се ствара у једном пожару, може се израчунати по једначини:

$$Q = qS\tau \quad [3.30]$$

где је:

$Q$  - укупна количина топлоте, у kJ

$q$  - специфичн топлотни флуks сагоревања, у kJ/m<sup>2</sup>h

$S$  - површина под пожаром, у m<sup>2</sup>

$\tau$  - укупно време трајању пожара, у h.

Укупна количина топлоте добијена масеном брзином сагоревања  $R_{1+2}$  износи:

$$Q = R_{1+2}H_i\tau [\text{kg/hkJ/kg h}] = [\text{kJ}] \quad [3.31]$$

где је:

$Q$  - укупна количина топлоте, у kJ

$R_{1+2}$  - масена брзина сагоревања, у kg/h

$H_i$  – топлотна моћ запаљивог материјала, у kJ/kg

$\tau$  - укупно време трајања пожара, у h.

Топлота створена сагоревањем преноси се на околину и загрева предмете до тачке паљења, чиме се пожар преноси са једног предмета на други. Пренос топлоте на

околину одвија се у виду провођења, конвекције и зрачења. Топлотно зрачење највише отежава приближавање ватрогасаца самом пожару. Озбиљне опекотине, на незаштићеној људској кожи, настају при преносу топлоте зрачењем од  $1,05 \text{ kJ/cm}^2$  у трајању од само 3 min .

Експериментима је утврђено да се најмање растојање млазничара од границе пожара може одредити по једначини:

$$l_m = 1,6h [\text{m}] \quad [3.32]$$

где је:

$l_m$  - удаљеност млазничара, у m

1,6 - експериментом одређен коефицијент

$h$  - средња висина пламена, у m .

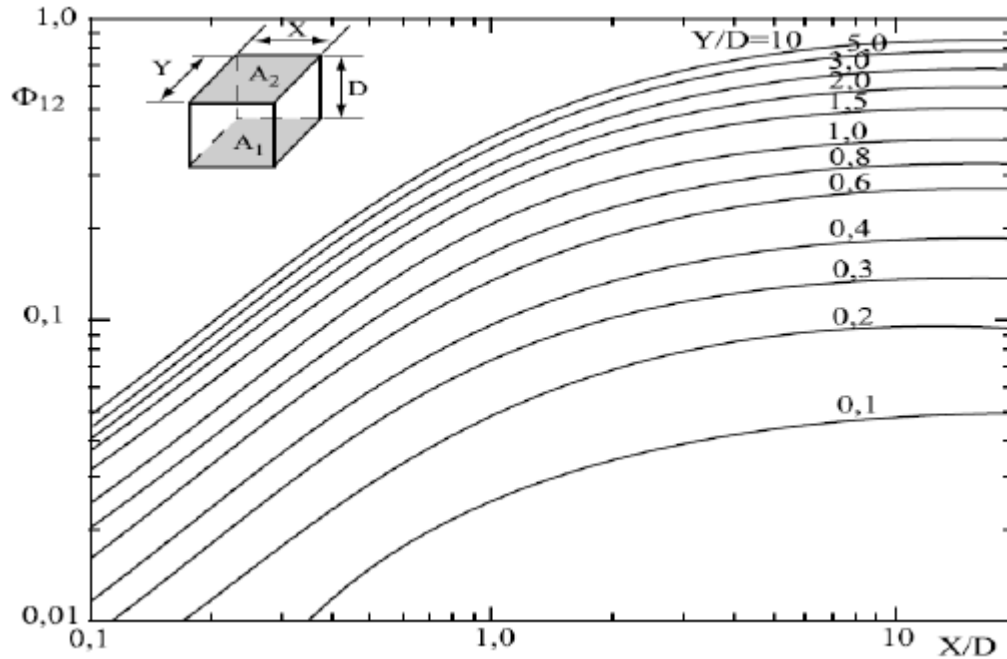
На пример, ако је средња висина пламена 10 m , удаљеност млазничара биће 16 m .

У пожару тунела, тела која зраче ће бити: тело које је у пожару, зидови и таваница тунела (када их је озрачила ватра), пламен и врели димни гасови као продукти пожара [Carvel, 2004]. За пожаре веће од око 1 m у пречнику, пламен и дим могу се сматрати да се понашају као црно, или сиво тело (за мање пожаре, емисија пламена може да буде одређена спектаром емисије угљен-диоксида и водене паре). Емитована енергија пламена зависи од концентрације честица чађи у њој. За то нам може послужити одређивање минималне висине пламена на којој се ствара димна перјаница. Пронађено је да висина перјанице дима обично варира у односу на развијену енергију сагоревања. [Ris-Cheng, 1994]. Производња чађи у диму и зрачење од пламена зависи од хемијске природе запаљиве материје, као и од услова геометрије и вентилације.

Максимално зрачење пламена на области различитих одстојања, које нас интересују, дате су на слици 3.9 .Одстојања зрачења температуре пламена су прорачуната узимајући као предпоставку да се зрачење пламена односи на црно тело Како је зрачење највеће код самог фронта пламена, то је зрачење на дијаграму приказано са растојања од 10 m .

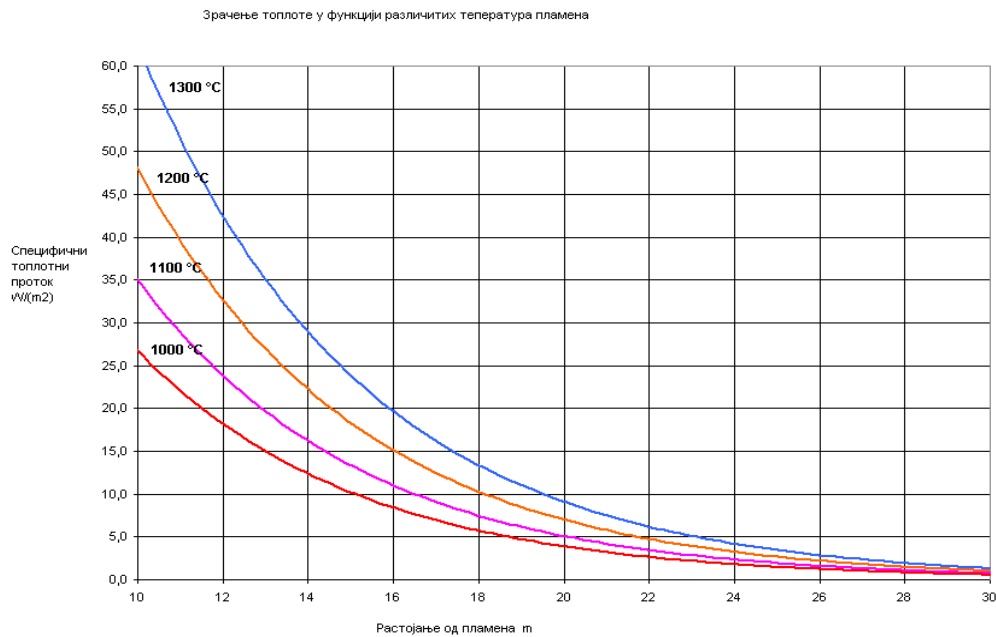


Дијаграм на слици 3.9. служи да би се одредиле вредности зрачења правоугаоних паралелних слојева, помоћу којих се може сагледати директна измена зрачења.



**Слика 3.9.** Вредности геометријских фактора зрачења између две паралелне правоугаоне површи [VDI, 1977]

Очигледно је да у тунелу, код потпуно развијеног пожара, доминантне температуре пламена могу дозволити приступ ватрогасним јединицама до 24 метара, узимајући у обзир ограничења дата из табеле 3.2. Даља приближавања жаришту се могу дозволити са додатним системима заштите од зрачења. Таква заштита од зрачења може се постићи ставарњем воденог екрана по читавом пресеку профила тунела распаршеним млазом воде или неким другим заштитним системом.



**Слика 3.10.** Зрачење у односу на одстојања од пламена [Pleß-Seliger, 2009]

Коининг [Koinig, 1999] описује дејства топлотног зрачења на ватрогасне јединице у табели 3.2.

**Табела 3.2.** Утицај зрачења на ватрогасне јединице [Koinig, 1999]

Зрачење топлоте kW/m <sup>2</sup>	Утицај на оперативну снагу
1,5	Ватрогасци имају довољно времена за инсталацију опреме и могу у дужем временском преиоду да раде
4,5	Ватрогасци могу да раде без додатног хлађења одела
8	Ватрогасци могу да раде само кратко и то са хлађењем одела

Подаци се могу упоредити са Ловсоном [Lawson, 1996]. Наведена вредност је добијена након што је дошло после 30s до опекотина 2. степена већ на одстојању од 6m удаљености до врата просторије под пожаром. Дејство ватрогасних јединица налази се такође у домену од 5 kW/m<sup>2</sup>.

### 3.4.12. Одређивање температуре у пожару

Стварна топлота створена сагоревањем запаљивих материја у току пожара, увек је нижа од теоријске. Разлози за то су ограничена количина кисеоника и губици топлоте на околину. Температура током пожара може се одредити непосредним мерењем (термоелементима) и прорачунати, као што је то дато у претходном тексту. Температура се такође може оријентационо одредити визуелно према боји или тачки топлења загрејаних металних делова (табела 3.3.).

Табела 3.3. Оријентациона температура према боји загрејаних челичних делова [Vidaković-Vidaković, 2008]

Боја загрејаног челичног дела	Температура °C
црвена (назирућа)	550
тамноцрвена	700
црвена као трешња	900
наранџаста	1100
бела	1400

Биланс развијене енергије у пожару утиче на ток развоја пожара. Висока температура уз дуже трајање пожара, утиче на пожарну отпорност грађевинских конструкција и потребно време за гашење пожара.

Генерално се може претпоставити да је у пожару тунела у раним фазама увек на располагању довољна количина кисеоника. Тако да постојећа материја сагорева у гасној фази готово комплетно уз развиој максималне енергије. То значи да у области сагоревања температура пламена остварује максималну вредност. Како између плафона и жаришта пламена постоји релативно мало растојање то брзо плафон тунела добија сву топлоту. У правцу развоја пожара енергија се преноси на конструкцију тунела. Енергија пламена и врући гасови доводе до рефлексије зрачиња од плафона на запаљив материјал. То убрзано загревање кондензоване фазе на крају доводи до бржег развој пожара. Феномен брзог развоја

проветраваних пожара у малим просторима одавно је познат. У овом случају практично брзина сагоревања гасовитих делова запаљиве материје, нема никакву улогу, јер је увек на располагању довољно кисеоника. Насупрот томе, брзина пиролизе, односно неповратно хемиско разлагање материје због пораста температуре без оксидације дешава се по утврђеним корацима. Овај пренос зависи од зрачења пламена околине на запаљиву материју. Одавно су за просторије у пожару направљене криве развоја температуре према различитим материјалима. Установљено је да амбијент и материјал у пожару могу имати значајан утицај на криву раста температуре.

### **3.5. Ширење пожара**

До сад је на развој пожара гледано кроз запаљиве супстанце. То је одговарало пожару натовареног камиона, или линерном ширењу пожара просутог горивог материја током сабраћајне несреће.

Поред овог ширења пожара постоји и линерно ширење пожара са једног возила на друга возила. Ингасон и Лонермарк [Lönnemark-Ingason, 2006] су у својим експериментима испитивали ширење пожара у тунелу Рунехамар на објекте који се налазе у правцу пловности димних гасова. За ту сврху су у правцу ширења пожара од центара, на правилним одстојањима узимали узорке. Како су током мерења вариране димензије пожара објекта то су током експеримента, на одстојању биле уведене и друге супстанце. Резултати ових експеримената су приказани у табели 3.4. Истраживања су показала да зрачење пламена ватре и конвекциони пренос топлоте преноси довољно енергије да се и на веће удаљености запаљив материјал пиролитички припреми, угљенише или деформише. Могуће је паљење у опсегу до око 50 m од центра пожара.

**Табела 3.4.** Утицај преноса топлоте (тунел **Рунехамар**) [Lönnermark-Ingason, 2006]

Растојање до жаришта (m)	Испитивање Т1	Испитивање Т2		Испитивање Т3		Испитивање Т4	
	пластика	дрво	пластика	дрво	пластика	дрво	пластика
20						+++	+
25						+++	+
27						+	+
35		+	+				
42				+	+	*	+
50		+	+				
52				+++	+		
53,5	+						
57						*	+
62				+++			
67						*	#
70		++	+				

+ не постоји, ++ опрљен, +++ угљенисан, \* неоштећен, # искривљен деформисан

Јасно је видљиво да се очекује, да у потпуности развијен пожар са димним гасовима, се преноси на друга возила.

Постоје бројне методе за процену опасности од пожара у тунелима, које се могу представити математички. То укључује различите врсте ширења пожара (линерана брзина сагоревања  $R_L$ ), као на пример линеарног ширења  $f(t)$ , квадратно ширење  $f(t^2)$  или експоненцијално ширење  $f(e^{-t})$ .

Цртеж криве пожара, је у основи данас за готово све зграде и објекте познат. Такодје је утврђена и стопа раста различитих пожара у функцији линеране брзне сагоревања. Према Беничоу [Benichou, 2005] предвиђене су четири могуће групе брзине ширења пожара за одабир мера за заштиту од пожара (Табела 3.5.).

**Табела 3.5.** Експериментални тестови квадратног ширења пожара [Benichou, 2005]

Ширење пожара	$\alpha(\text{kW/s}^2)$	Потребно време да се достигне 1MW у s
полако	0,0029	600
средње	0,012	300
брзо	0,047	150
врло брзо	0,188	75

На сличан начин је Хак [Нааск, 2001] је направио криве за пожаре тунела. Основа табеле био је пожарни тест Рунхаммер (*Runehammer*) (табела 3.6.) као и линерани пожар према Лакроиксу [Lacroix, 1997] (табела 3.7.)

**Табела 3.6.** Експериментални тестови квадратног ширења пожара [Нааск, 2001]

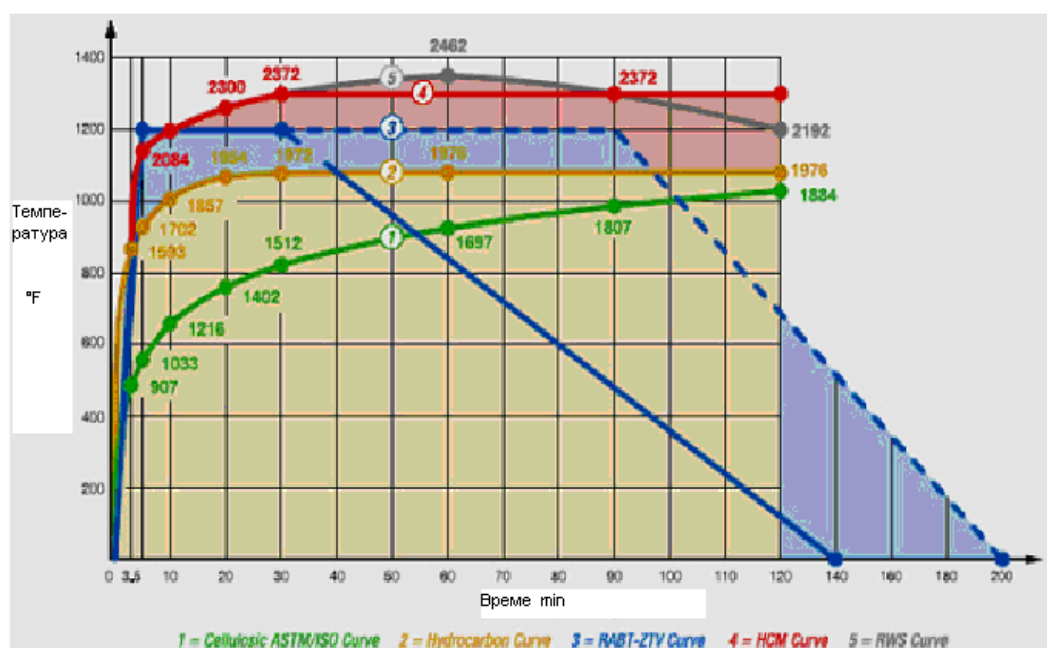
Тест	Време ослобођене количине топлоте до пика у s	Линерано ширење пожара kW/s	Пикови ХРР MW
1	1110	341,7	203
2	858	483,3	158
3	624	283,3	124,9
4	462	295	70,5

Из ових података је већ јасно да се пожар у тунелу развија врло брзо у функцији брзог издвајања гасне фазе линераног ширења пожара уз појаву високе температуре сагоревања. На крају је то довело до стварања различитих кривих пожара тунела, која су често повезане и представљене са другим стандардним кривама пожара.

Према Хаку [Нааск, 2001] представљен је на слици 3.11 цртеж криве пожара да би се одредиле пожарне мере у току пожара у тунелима.

**Табела 3.7** Експериментални тестови ширења пожара за тунел [Lacroix, 1997]

Параметар	< 2,7m	У средини тунела 2,7 m -3,5 m	> 3,5m Без опасних материја	> 3,5m Опасне материје
Типични сценарио	2-3 аутомобила	1 доставно возило	1 камион	1 танкер са бензином
ХРР MW	8	15	30	200
Линеарно ширење пожара min	5	5	10	10
Дужина трајања максималне температуре ( $t_{max}$ ) min	20	30	60	60
време сагоревања мин	20	20	30	30
Ослобођена енергија GJ	15	40	150	1000
Брзина стварања количине дима m <sup>3</sup> /s	30	50	80	300



**Слика 3.11.** Цртеж криве пожара Промат [Promat, 2008]

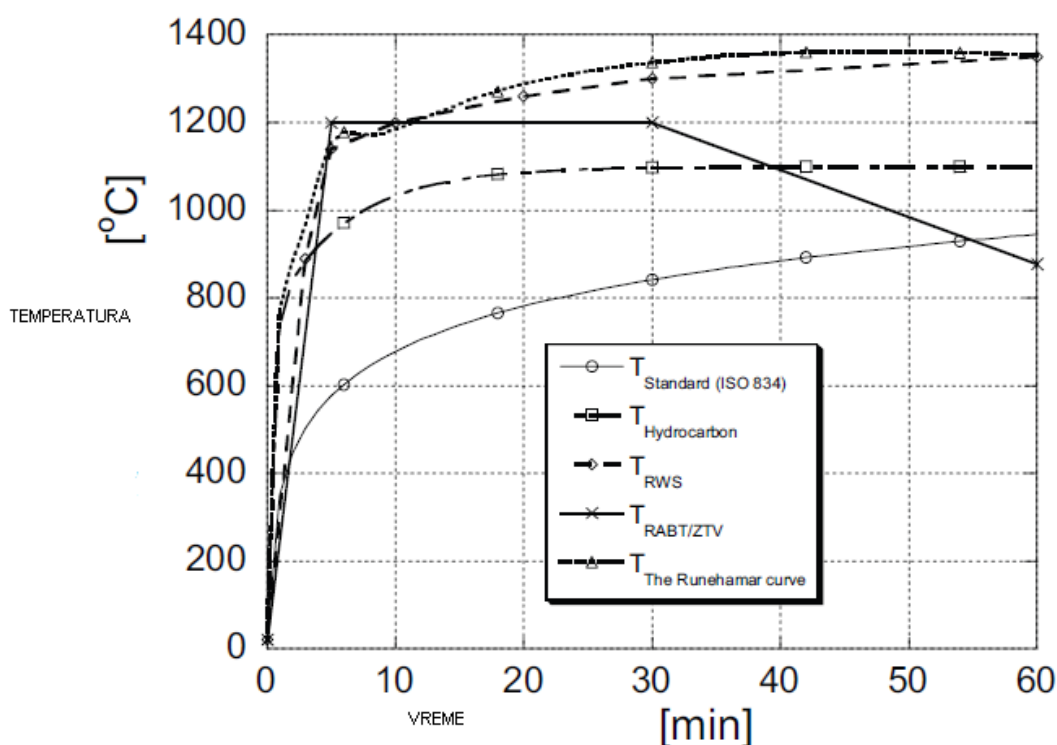
За све криве (са изузетком АСТМ / ИСО криве) постигнута је заједничка температура од 1000°С већ у току првих 10 минута од почетка пожара. Стога је за очекивати у већини случајева веома брз развој пожара, који већ у периоду 5 до 10 минута, доводи до подпуног развијеног пожара. Ингасон [Ingason, 2006] је дао примере цртежа сценарија других криви пожара, да би се вредности достигнутих температура боље упоредиле (Табела 3.8). Осим тога, то такође показује да се пораст температуре пожара малих возила, другачије развија у односу на велике масе материјала.

**Табела 3.8.** Сређени сценарији пожара за различите криве развоја пожара [Ingason, 2006]

ХРР MW		Пример за путни саобраћај	Пример за возове	Пример за метро	Граничне вредности у односу на криве температуре	
О П А С Н О С Т П О Ж И В О Т	О П А С Н О С Т З А Т У Н Е Л	5	аутомобили	Електро локомотива	Вагон пожарно отпоран	<i>ISO 834</i>
		10	Аутомобили и доствна возила		Нормално пожарно отпоран	<i>ISO 834</i>
		20	Камион Аутобус Универзални камион	возило на шинама	2 вагона	<i>ISO 834</i>
		30	Бус и паразан камион	Отворени вагони	Више од 2 вагона	<i>ISO 834</i>
		50	Камион са запљивим товаром			<i>ISO 834</i>
		70	Камион 4т			<i>HC</i>
		100	Камион, просечан			<i>HC</i>
		150	Камион са лако запаљивом материјом (10t)			<i>RWS</i>
		>200	Ауто цистерна или камион са приколицом за проветравањем	проветравани		<i>RWS</i>

Лонермарк [Löppermark 2005] је закључио да се са повећањем створене енергије у жаришту пожара мора да повећава и температура пожара. Из тог разлога је у тунелу Рунехамар развио тест за добијање сопствене криве температуре (Слика 3.12).





**Слика 3.12.** Крива температуре из тунела Рунехамар упоређена са осталим корисним кривама [Lönnermark 2005]

Јасно је да је развијена енергија жаришта пожара у вези са повећањем пожарног оптерећења на камионима, од запаљивих материја, што доводи до продужења времена трајања пожара. Фреквентност саобраћаја у тунелу доводи до пораста пожарног оптерећења, по површини тунела и самим тим до продужења времена трајања пожара уз пораст температуре. Тако може да се деси да се пожар прошири на неколико возила у исто време што доводи до додатне енергије сагоревања. Пожари неколико возила битно повећавају захваћену површину под пожаром, тако да је прилаз ватрогасних јединица до жаришта, и ефикасно гашење отежано. Ови пожари такође су значајно већи, као што се показало у реалним пожарима тунела. [Lönnermark ,2005]

У табели 3.9. Ингасон и Лонермарк [Ingason-Lönnermark, 2004] су сажели неколико студија пожара тунела.

**Табела 3.9.** Студија пожара тунела [Ingason-Lönnermark, 2004]

Развијена енергија MW										
	PIARC		RABT	SETU (F)	NFPA 502	Тестирање пожара				Очекивање #
	1997	1999				1994	1996/97	1998	реално	
Аутомобил	5			2,5	5	1,5-2				
Аутомобил (већи)				5						
Доставно возило (за пластиком)		2,5-8				5-6	2,5-9			3-10
1-2 аутомобила			6-10							
2-3 аутомобила				8						
Доставно возило		15		15						
1 аутобус градски		20			29-34	29-34				36
Аутобус/ камион без опасних материја	20		20-30	20	20				20	
ХГВ				30	100-130	128				150-400
Аутоцистерна	100	100	50-100	200	100	20-100				120-300
Пренос бензина од 400 l									50	
Пренос бензина од 800 l									100	
Разноврсна роба 2900 kg						15-17				
Тестирање ХГВ								71-223		
Вагон						12-47				3-100

# узете у обзир максималне вредности

#### 4. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

Крајем прошлог и почетком овог века, истовремено са експанзијом и све већим коришћењем саобраћајних тунела у свету, догодили су се бројни пожари са катастрофалним последицама: великим бројем људских жртава и огромном материјалном штетом.

Из тог разлога покренути су многи веома скупи и обимни научно-истраживачки пројекти. Вршени су пожарни експерименти у тунелима, чак је саграђено неколико експерименталних тунела у ту сврху.

У свом раду Беард и Карвел, [Beard-Carvel, 2005] дали су преглед и извршили систематизацију свих до тада познатих пожарних експеримента вршених у тунелима. Према њиховима наводима експериментална истраживања су вршена у тунелима: Офенег (Ofenegg Tunnel, 1965), Вест Меон тунелу (West Meon Tunnel, 1970), Гласгов Тунел (Glasgow Tunnel, 1970), Звенберг Тунел (Zwenberg Tunnel, 1976), ПВРИ Тунел (PWRI Tunnel –The Japanese Public Work Research Institute, 1980), Лапенранта Тунел (Lappeenranta Tunnel, Finland, 1985), “ФИРЕТУН” тестови (The EUREKA EU-499 “FIRETUN” test series, 1990-1992, Norway, Germany, Finland Tunnels), Хамерфест Тунел (Hamerfest Tunnel, France, by INERIS, 1992), Мемориал Тунел тестови (Memorial Tunnel Fire test ventilation Program, 1993-1995), Еуротунел тестови (Fire Supression Tests for Eurotunnel, 1998-1999), Монт Бланк тунел тестови (Mont Blanck Fire Tunnel Investigation fire tests, 2000), Мадрид метро (Testing fire suppression for Madrid metro, 2001), Бенелукс тунел тест (“Project Safety Tests”:tests in the 2<sup>nd</sup> Benelux Tunnel, the Netherlands, 2001), тестови у тунелу Тоумей-Меишин (Fire tests carried out in the Toumei-Meishin expressway tunnel, Japan 2001), пожарни тестови у Рунехамар тунелу (The Runehamar Tunnel fire tests series, 2003). Поред тога, а након 2005. године, вршени су тестови у тунелу Сан Педро де Анес (TÚNEL EXPERIMENTAL DE SAN PEDRO DE ANES, 2007, 2011).

Такође, они наводе да су пожарни тестови вршени и у оперативним тунелима: Дес Монтс тунел (Des Monts Tunnel), Фрејус тунел (Frejus Tunnel), Монако Бранч

тунел (Monaco Branch Tunnel), ФФФ тунел (FFF Tunnel), Гранд Маре тунел (Grand Mare Tunnel, Rouen), Бифјорд тунел (Byfjord Tunnel), Бомлафјорд тунел (Bomlafjord Tunnel), а да су на моделима тунела тестови вршени у: Јапану (Small-scale fire experiments, Japan 1960-1981), Аустралији (Pool fire tests at the Londonderry Occupational Safety Centre, Australia, 1990), ИНЕРИС тунелу у Француској (Tunnel fire experiments to test places of safety, INERIS, France, 1991), ХСЕ тунел у Великој Британији (Reduced-scale tunnel, Buxton, UK, 1993), СП и ФОА тунелима у Шведској (Test series carried out by the Swedish National Testing and Research Institute (SP)), Test series carried out by the Swedish Defence Agency (FOA). Поред тога, а након 2005 у литератури се може пронаћи да су тестови у том периоду рађени и у ЛСА ИДФ тунелу у Немачкој (Institte der Feuerwehr Sachen – Anhalt, Hryrothsberge (LSA Idf), Germany, 2003).

Поред тога, вршени су и лабораторијски експерименти: у модел тунелу Париског метро, при чему је вршено испитивање кретања дима (A scale- model to investigate smoke movement in Paris Metro, 1991), затим у ХСЕ тунелу, где је експерименталним путем устранивљавана тзв. критична брзина принудног струјања ваздуха (Critical velocity experiments in a laboratory - scale model of the HSE tunnel, 1995) итд. Поред тога тестови су рађени и у БАМ Институту (Bundesanstalt Für Materialforschung Und –Prüfung, Berlin, Germany, 2011).

Почетком '70-тих појавили су се први комјутери који су омогућили нешто сложеније термодинамичке прорачуне неконтролисаног сагоревања. Тако су на Архитектонском факултету у Минхену први пут истраживани и добијени дијаграми пораста температуре пожара у затвореном простору а у функцији времена и брзине сагоревања. Увођењем бројних параметара у основне билансне и конститутивне једанчине, а посматрајући цео простор као једну контролну запремину, у докторској дисертацији [Видаковић, 1983] показао је да је чисто аналитичким прорачуном могуће предвидети развоја пожара и добити резултате готово идентиче експерименталним. Теоретска истраживања и каснији експериментална истраживања истог аутора на Универзитету у Бриселу (Univezitet Libre de Brisele) [Видаковић, 1983] створили су основе за прављење софтвера за предвиђање развоја пожара у зградама. Ипак, на основу својих

истраживања до првог софтвера којим је могуће извршити симулацију контроле температуре током хипотетичког пожара у затвореном простору, са променљивом количином, дошао је Јапански научник Кавагое [Kawagoe, 1963]

Даљим брзим развојем компјутерске технологије, почетком '80-тих годна, и развојем посебне области механике флуида - нумеричке механике флуида (Computational Fluid Dynamics – CFD), појавила се могућност решавања практично свих проблема механике флуида, који немају аналитичка или су им решења била непозната. Поделом простора на велики број диференцијално малих контроних запремина и спрегнутим решавањем сада диферентних биланских једначина, међусобно повезаних једнакошћу величина и протока на граничним површима контролних запремина, створена је могућност и за развој и по први пут детаљно предвиђање и процеса сагоревања и симулације развоја пожара.

На овој идеји и на основу методе тзв. смицања мреже чворова или СИМПЛЕР (*SIMPLER*) алгоритма, Патанкара [Patankar, 1980], Спалдинга [Spalding, 1981], настао је први први комерцијални ЦФД софтвер ФЕНИКС (*PHOENICS*). Такође, на истој идеји касније са развијају и други комерцијални софтвери као што су ФЛУЕНТ, STAR-CD, али и софтвери специјализовани за нумаричке симулације пожара, нпр. Коксов (*Cox*) софтер ЈАСМИН (*JASMINE*), као и софтвер за симулације пожара у затвореним просторима - Флоу3Д (*Flow3D*). Сходно томе, почетком 1985, компјутерска симулација пожара тунела је систематски развијана од стране Кумара и Кокса [Kumar-Cox 1985, 1987, 1988,]. У том оквиру, тунели представљају посебне затворене просторе где се дешава пожар (*compartment fires*). Након успешног коришћења програма Флоу3Д (*Flow3D*) на пожар у Лондонској подземној железници станице Кинкс Крос (*Kings' Cross*) од стране Кокса [Cox, 1989] и Симкокса [Simcox, 1988a, 1988b, 1992], метод моделирања поља у области пожара просторија добио је и професионално признање.

У наставку својих истраживања и даље се држећи принципа да је неопходна експериментална провера резултата нумеричких симулација, Кумар и Кокс [Kumar-Cox, 1985] упоређивали резултате својих симулација са експерименталним резултатима који су добијени у експериментима у Звенгберг (*Zwengberg*) и Офенег (*Offenegg*) тунелу. Коришћена је једначина реакције за

хексан, а за турбуленцију је коришћен двоједначински  $k - \varepsilon$  модел. Поређење је показало задовољавајућа слагања између експерименталних података и резултата симулације, на одређеној удаљености од ватре у условима јаке вентилације, и у непосредној близини ватре, изузев на позицији директно изнад ватре. У циљу унапређења модела, исти истраживачи у претходни модел уводе једначине којима укључују и утицај процеса зрачења и храпавости површине [Kumar-Cox, 1987, 1988,] и тако развијају програм ТУНФАЈЕР (*TUNFIRE*). Преглед проблема моделирања пожара у тунелу уз примену ефекта зрачења Кумар је представио у свом раду [Kumar, 1992].

Коришћем тада већ стандардног  $k - \varepsilon$  модела турбулентних напона, Флечер се бави нумеричким прорачуном кретања дима као последице сагоревања (са запаљеним горивом у посуди) у вентилираном тунелу [Fletscher, 1994].

Сопствени софтвер за симулацију пожара, независно од колега са запада, започње у Јапану да развија Кавагое и наставља Хуе [Хуе, 1993, 1994, 1995, 2001]. Они развијају тродимензионални, нестационаран програм за израчунавање, који је уврстио геометрије тунела у условима турбулентног струања и тиме унапређују  $k - \varepsilon$  модел. Током рада користили су модификован алгоритам СИМПЛЕР (*SIMPLER*) за криволинијске координате. Модел је упоређен са експерименталним резултатима и слагање је било задовољавајуће, осим у области изнад самог пожара.

Температуре загрејаног ваздуха је такође истраживао Хуе [Хуе, 1994] и експериментално и нумерички испитао. Модел је затим примењен на експериментима, који су спроведени у Јапану 1987. Поређење са експериментима је дало задовољавајућа поклапања [Хуе, 1995]. Тестирана су три различита нумеричка модела сагоревања у тунелу [Хуе, 2001]. При томе је коришћен модел зрачења (*Discrete Radiant transfer model, DRTM*). Такође се користио и такозвани "турбулентни модел великих Рејнолдсових бројева " који је узимао у обзир и ефекат узгона и пловност. Утврђено је да су модели сагоревања дали задовољавајуће резултате, при чему нису све карактеристике пожара затвореног простора биле задовољене.

У Великој Британији средином 90-их од стране Водбурна и Бритера [Woodburn-Britter, 1996a, 1996b], вршен је прорачун програмом Флоу 3Д (*Flow3D*) опште

намене, и упоређен са експериментима. Прорачуни су вршени директно у пожару. У Шведској је код ЈАСМИН (*JASMINE*) тестиран [Tuovinnen, 1996] од стране Тоувинена и такође су добијени задовољавајући резултати.

Доста испитивања је вршено на тему утицаја различитих система вентилације на пожар и дим у тунелу.

Посебна пажња у овим истраживањима била је усмерена и на изучавање процеса тзв. нестабилног (пулсирајућег) сагоревања. Оваква врста сагоревања јавља се при ограниченој количини ваздуха, као главном фактору, што даље проузрокује интензивно пулсирајуће ослобађање енергије, нестабилност процеса и остале пратеће процесе. Студија, у којој је Ким представио експерименталне резултате које споровео у тунелу Рунехамар [Kim, 2006], детаљно су анализирани услови који доводе пулсирања, као и сам процес пулсирајућег сагоревања. У наведеној студији показано је да су вредности ослобеђених топлотни протока у сва четири спроведена експеримента били између 100 MW и 220 MW, као и да је процес пулсирања периодичан [Kim, 2006]. Истовремено, показано је и да постоји директна зависност између интензитета ослобеђених топлотних протока и процеса пулсирања, те да се могућност појаве локалних места са ограниченом количином ваздуха не може искључити. Због високе температуре, чак и у диму се може десити накнадна оксидација угљен-моноксида. Пулсирајућа струја дима стога касније може довести до поновног паљења, као што се то често дешава у пожарима на отвореном простору.



**Слика 4.1.:** Сlike пулсирања у тунелу Рунехамар, извучене из видео снимка [Kim, 2006]

Нешто другачија испитивања била су спроведена у циљу сагледавања и анализа услова који доводе до ширења пожара и утицаја начина рада и распореда система за вентилације. У овој групи истраживања свакако највећи број научних радова

био је посвећен феномену повратног тока димних гасова („*backlayaring*“), тј. одређивању тзв. критичне брзине струјања вазуха. Наиме, у случају да дође до пожара у тунелу у коме нема вентилације, услед разлике у густинама, врели продукти сагоревања подизаће се изнад пламена и увлачити околни ваздух формирајући димни облак. Уздижући димни облак досећи ће плафон и формирати два супротно усмерана тока дима који ће се пловити услед повећане температуре у односу на околину дуж плафона. У случају када се укључи подужни вентилациони систем, симетрија уздижућег дима и његова пловност дуж свода тунела биће нарушена. Уздижући димни стуб ће се искривити, а дужина супротно смерног димног тока, који се простире у смеру супротном од смера вентилационог млаза ће се скрати. Ова супротно смерно кретање дима позната је под називом „*backlayaring*“. Описана ситуација приказана је на слици 4.2.



Слика 4.2.: Ширење дима у тунелу за пожар топлотне снаге 15 kW , [Wu - Bakar, 2000]

Познавање понашања супротно смерне пловности дима уско је повезано са стратегијом спасавања путника у случају пожара у тунелима. Будући да кретање дима по правилу директно утиче на обезбеђивање евакуационог пута, односно слободног простора без дима и врелих продуката сагоревања. У случају једносмерних тунела, са подужним вентилационим системом, обезбеђивање тог „пута“, односно контрола кретања дима, обично се своди на увођење довољно велике количине свежег ваздуха помоћу вентилатора. Проток тог свежег ваздуха треба да буде управо толики да спречи кретање дима у супротном смеру, односно да спречи појаву повратног слоја дима. При томе, брзина ваздуха у тунелу, која одговара минималном протоку ваздуха, који може да спречи појаву повратне



пловности слоја дима, представља критичну брзину струјања ваздуха. Најзначајни радови из ове области припадју ауторима, Томасу [Thomas, 1968], Данзигеру и Кенедију [Danziger-Kennedy, 1982], Оки и Аткинсону [Oka-Atkinson, 1995], Вуу и Бакару [Wu-Bakar,2000] чији су основни резултети приказани у табели.

**Табела 2.1.: Критична брзина струјања ваздуха**

ИЗРАЗ	НАПОМЕНА	ИЗВОР
$U_c = \left( \frac{g \cdot H \cdot \dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot c_p \cdot A} \right)^{1/3}$		[Thomas, 1968]
$U_c = \left( \frac{g \cdot H \cdot \dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot c_p \cdot A \cdot R_{i,c}} \right)^{1/3}$	$R_{i,c} = 4,5$	[Danziger-Kennedy, 1982]
$U_c^* = 0,35 \left( \frac{\dot{Q}^*}{0,124} \right)^{1/3}$ за $\dot{Q}^* < 0,124$ $U_c^* = 0,35$ за $\dot{Q}^* > 0,124$	$U_c^* = U_c / \sqrt{g \cdot H}$ $\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot c_p \cdot g^{1/2} \cdot H^{1/2} \cdot A}$	[Oka-Atkinson, 1995]
$U_c' = 0,4 \left( \frac{\dot{Q}'}{0,20} \right)^{1/3}$ за $\dot{Q}' \leq 0,20$ $U_c' = 0,40$ за $\dot{Q}' > 0,20$	$U_c' = U_c / \sqrt{g \cdot \bar{H}}$ $\dot{Q}' = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot c_p \cdot g^{1/2} \cdot \bar{H}^{5/2}}$ $\bar{H} = 4 \cdot A / P$	[Wu-Bakar,2000]

Поређењем резултата добјених нумерчким симулацијама  $k-\varepsilon$  моделом турбулентних напона са експерименталним резултатима, Вудбурн, Битер [Woodburn-Britter 1996а, 1996b], Флечер и др. [Fletcher, 1994] покушали су да отклоне недостатке овог стандардног модела да обухвате узгонске ефекте и правилно предвиде брзину и опсег простирања повратног димног тока у супротном смеру од смера вентилационог тока ваздуха. ЦФД моделирање је успешно ухватило кретање повратног димног тока у симулацијама неких великих пробних пожара, као што је већ поменути горе Звенгберг пожар [Kumar and Cox, 85], као и за пробни пожар Леа [Lea, 1995]. Такође је утврђено да ЦФД моделирање може адекватно симулирати брзинска и температурна поља у правцу струјања главог тока, али не може адекватно предвидети температуру у близини пожара. Потребна је даља провера ЦФД кодова са детаљним и комплетним експерименталним подацима.

На примеру пројектовања вентилационог система, односно система за одимљавање гараже у случају пожара, Бањац и Николић [Banjac-Nikolić, 2009a] су приказали основну проблематику приступа ЦФД-а решавању проблема избора одговарајућег режима рада вентилационог система, те одређивања оптималног положаја отвора за убацивање свежег, односно избацивање задимљеног ваздуха. Такође, исти аутори су, коришћењем експерименталних резултата о динамици сагоревања запаљеног аутомобила и према препорукама ПИРАК-а (*PIRAC*) одређених радних режима вентилатора, извршили проверу вредности тзв. критичне брзина струјања ваздуха којом ће се спречити продор дима у евакуационе ходнике [Banjac-Nikolić, 2009b].

Бавећи се тражењем одговора на практично иста питања као и у случају експерименталног приступа Бакар [Wu-Bakar,2000] је урадио студију контроле кретања дима приликом пожара у тунелу коришћењем лонгитудиналних вентилационих система. Поређење ЦФД (CFD) симулација са експерименталним резултатима је показало, да су подаци добијени симулацијама дали нешто ниже али прихватљиво добре вредности за поља брзина. Међутим, предвиђања температура у пољу обухваћеном пожаром су била исувише висока.

Симулирање утицаја развоја пожара и количине ослобођене топлоте на критичну брзину вентилације у подземној железници, помоћу ЦФД модела ФДС (*FDS Fire Dynamics Simulator*) са циљем побољшања модела вршио је Бон [Boon, 2005]. До недавно ова критична брзина струјања ваздуха одређивана је искључиво на основу израза заснованих на употреби Фрудовог броја, коригованог одговарајућим експерименталним константама. Најчешће коришћени модели су они предложени од стране Хелдсена [Heselden, 1976], Дезингера [Danziger-Kennedy, 1982] и Кенедија и Парсонса [Kennedy-Parsons,1996]. Ови модели су сугерисали да вредност критичне брзине за хоризонталне тунеле је пропорционална једној трећини снаге топлотне енергије ослобођене у пожару. Међутим, недавни тестови пожара у тунелу од стране Бетиса [Bettis, 1993, 1994] показали су да је при малим количинама ослобођене топлоте вредност критичне брзине пропорционална једној трећини снаге ослобођене топлотне енергије, док при већим количинама

ослобођене топлоте, критична брзина постаје скоро независна од ослобађене топлоте за различите величине пожара.

Најобухватнији пожарни тестови, посвећени анализи истог феномена, обављени су у Меморијалном тунелу (*The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Programme, West Virginia, USA*) [Bendelius, 1996]. Експерименти извршени од стране Парсонса [Kennedy-Parsons, 1996], показали су да претходни изрази базирани на Фрудовом броју, за пожаре у распону од 50 до 100 MW за око 5 - 15%. прецењују критичну брзину вентилације. Такође, тестовима извршених у Меморијалном тунелу је показано да супер-критична брзина вентилације може да постоји за велике пожаре. Зато модели засновани на Фрудовом броју нису погодани да предвиде критичну вентилацију при великим брзинама ослобађања топлоте. Због тога је настала потреба да се уђе у механизме, а посебно у услове промене у односима између критичне брзине вентилације и количине ослобођене топлоте у пожару.

Да би се испитао однос између критичне брзине и количине ослобођене топлоте у пожару, Ока и Аткисон [Ока-Atkinson, 1995], су систематски проучавали кретање дима користећи хоризонтални модела тунела. У овом истраживању, бездимензиона количина ослобађене топлоте и бездимензиона критична брзина вентилације коришћени су за анализу експерименталних резултата и како тунела у размери, тако и умањеног модела. Нова формула за предвиђање критичне брзине је предложена на основу анализе добијених података. Утицај нагиба тунела на кретање дима у тунелу је такође био проучен од стране Аткинсона и Ву-а [Atkinson-Wu, 1996] који су користили исте моделе тунела. Фактори корелације нагиба за критичну брзину су препоручени, на основу експерименталних резултата. Утицај геометрије тунела на критичну брзину вентилације остао је нејасан и остало је да се испита пре него што се формула може применити за тунеле било којих облика.

Мухасиловић и Девил су [Muhasilovic-Deville, 2007] симулирали и анализирали узајамни утицај закривљености саобраћајног тунела и кретања продуката сагоревања и топлотног зрачења пламена у случају пожара. У симулацијама које су вршене за тунел Оргус, кретање продуката сагоревања је пратило линију тунела и нису примећене очекиване разлике у дистрибуцији чађи, температуре и

зрачењу у попречним пресецима. Са обзиром да је тунел имао благе закривљености, остало је нејасно колико закривљеност тунела има утицај на поменуте параметре..

Користећи различите варијанте модела ПОЖАР-СПРИНТ Карвел је истраживао ефекте пламена и самопаљења и открио да се са повећањем дотока ваздуха повећава енергија пожара [Carvel, 2005]. Кроз анализу обављених тестова у тунелу Меморијал, могао је одредити дужине пламена. Као критеријум за разматрање је коришћена температура гаса од 600°C на око 4 m висине. Са серијом различитих тестова са различитом енергијом пожара одређене су дужине пламена, а затим и вероватноће паљења материје у тунелима. Са овом методом је утврђено да пламен пожара са енергијом мањом 128 MW у свим ситуацијама оводи до паљења камиона на 20 метара одстојања. Слично томе, енергије пожара од 64 до 128 MW могу да запале супстанце ако су растојања мања од 10 метара. Код енергија од 32 до 64 MW, постоје знатане разлике у односу на ефекте пламена, иако тунели са две траке имају смањену вероватноћу паљења, ако су одстојања већа од 10 m. У тунелима са једном траком, вероватноћа паљења запаљиве материје прилично је висока, посебно са вишим брзинама ваздуха. За енергије пожара у распону од 16 до 32 MW постоји мала вероватноћа паљења осим код малих одстојања између возила, или у случају тунела са једном траком и великим брзинама проветравања. У случају судара је могуће ширење пожара на друга возила и тада предходни закључци не важе јер се сматра да су возила згуснута на малом одстојању.

Да би предвидела температуре зрачења ватре, површинску снагу зрачења и радијацију, Вела је спровела ЦФД (*CFD*) симулације великих кружних пожара тј. пожара посуде са горивом (ЈП-4) у мирним условима и под утицајем попречног тока ваздуха [Vela, 2009]. Овај рад приказује између осталог 3 нова смера у приказивању површинске снаге зрачења помоћу компјутерске симулације. За симулацију површинске снаге зрачења развијена је 4-степенa дисконтинуирана функција која садржи ефективни коефицијент емисије дисипацијских структура ватре у зависности од температуре (реактивна зона, вруће тачке и честице дима) и ефективни коефицијент емисије ваздуха. ЦФД симулације показале су како је ветар утицао на дужину, нагиб пламена, повлачење пламена по земљи, отпор,

температуру пламена, површинску снагу зрачења и радијацију (исијавање).  
Употребом ових ЦФД симулација топлотно зрачење од великих кружних пожара  
може бити тачније процењено.

## **5. ПРИКАЗ И АНАЛИЗА РЕПРЕЗЕНТАТИВНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА**

У циљу проналажења и провере квалитета математичког модела којим ће моћи да се врше поуздана предвиђања топлотно струјних карактеристика пожара у тунелима, у сврху поређења резултата нумеричке симулације и експерименталних података, након детаљног прегледа података из доступне литературе, као најпотпунији и најрепрезентативнији изабарани су експериментални подаци добијени у Институту за пожарна испитивања Сашен-Анхалт (*Institute der Feuerwer Sachen-Anhalt*) у Хејротсбергу (*Heyrothsberge*), Немачка, 2003 године. Детаљан приказ поступака и услова под којима су спровођени експерименти дат је у наставку [Kohl, 2003].

### **5.1 Експериментална истраживања пожара у Ватрогасном институту Сашен-Анхалт (Хејротсберг, Немачка)**

У пожарном тунелу ЛСА ИДФ (*LSA IdF*), су спроведени тестови пожара са хептаном и бензином. Истраживачки пројекат имао је за циљ да истражи утицај пожарне отпорности мобилних система и вентилације на спашавања и гашење пожара у тунелима.

#### Експерименти

У пожарном тунелу су спроведени тестови са хептаном и бензином. Укупно је спроведено 12 експеримената. Експерименти од првог до шестог (1-6) су били прелиминарни и коришћени су за оптимизацију подешавања мерења. Експерименти 7-12 су били главни експерименти. Главни експерименти су се састојали од две серије експеримената, друга серија је била понављање прве. За нумеричке симулације су као репрезентативни одабрани тестови од 7-10, јер су сви спроведени са природном вентилацијом и истом количином горива.

У експериментима су мерени следећи параметри:

1. температура
2. брзина
3. проток гасова, нарочито за одређивање брзине пламена - двосмерне сонде
4. губитак масе током теста пожара
5. концентрација гасова  $CO$ ,  $CO_2$  и  $O_2$

Снимљен је видео запис. Са метеоролошком станицом, мерени су спољни услови током експеримената, због могућих утицаја на развој пожара. (температура ваздуха, правац ветра, брзине ветра, влажност ваздуха и барометарски притисак).

## 5.2. Геометрија

Пожарни тунел се састоји из два дела. Први део је чини стварни тест тунел, који је затворен објектом са предње стране. Објекат је затворен гвозденим вратима. Продукти сагоревања се испуштају преко димњака у животну средину.



Слика 5.1. Изглед тунела ИДФ ЛСА (*LSA Idf*) са предње стране [Kohl, 2003]



**Слика 5.2.** Изглед тунела Идф ЛСА (*LSA Idf*) са предње бочне стране [Kohl, 2003].

На другом крају канала, у предњем објекту је вентилациона комора, у којој су инсталирана два вентилатора. Вентилациона комора има бочно постављене вентилационе отворе који омогућавају потребан доток ваздуха. На око 6 метара удаљености од одвода ваздуха налази се вентилатор и постављена је мрежа за усмеравање протока ваздуха. Дуж тунела се налазе експерименталне собе.

Тунел је дугачак 34 m (са тремом 37 m), ширина је 4,5 m и висине 3,02 m без лука (са луком 5,22 m).

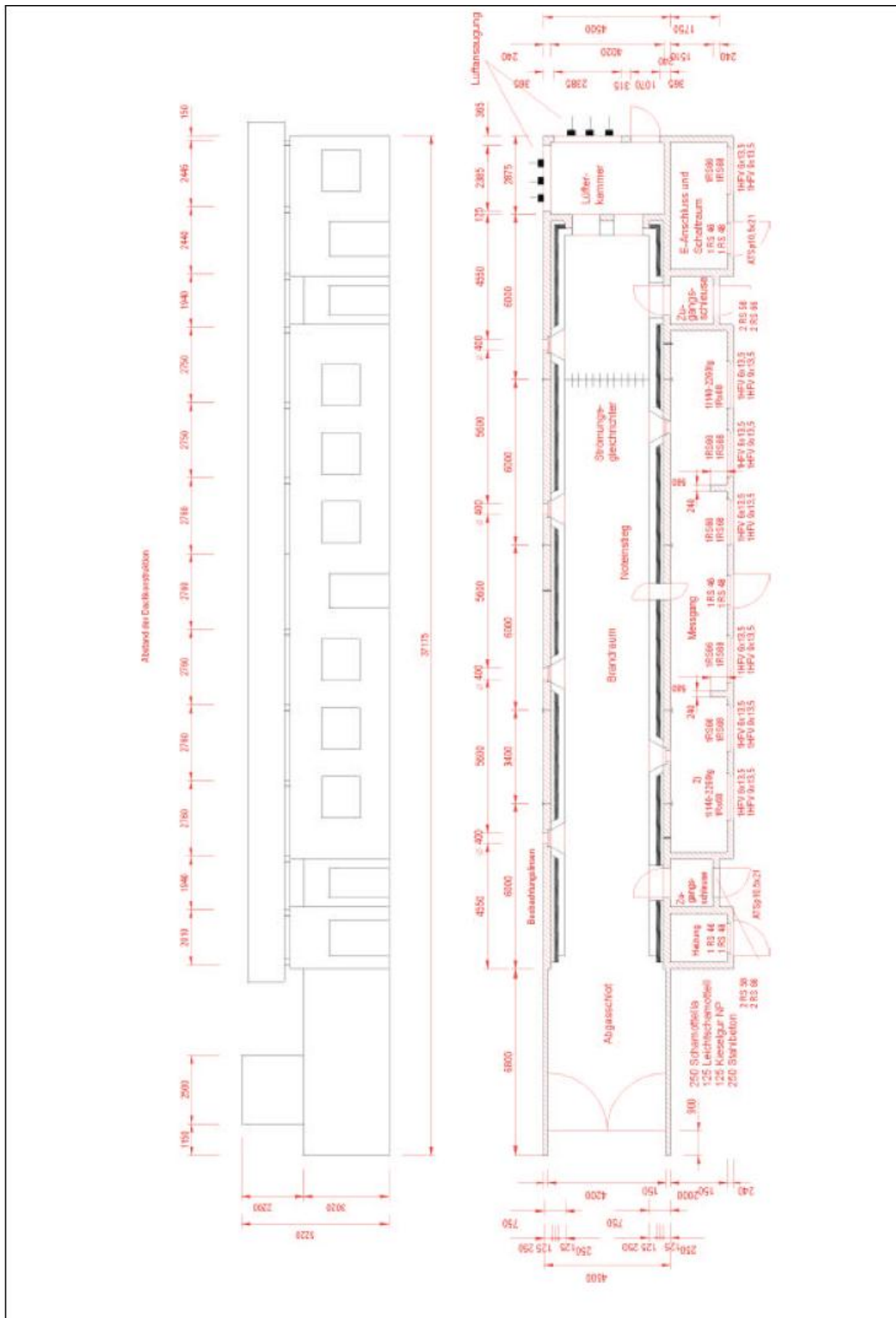
Попречни пресек експерименталне просторије пожарног тунела може се представити као збир правоугаоне површине димензија 3 m x 1 m и полу-кружне површине пречника 3 метра. Употребљива дужина протока од почетка предњег објекта је око 20 m.



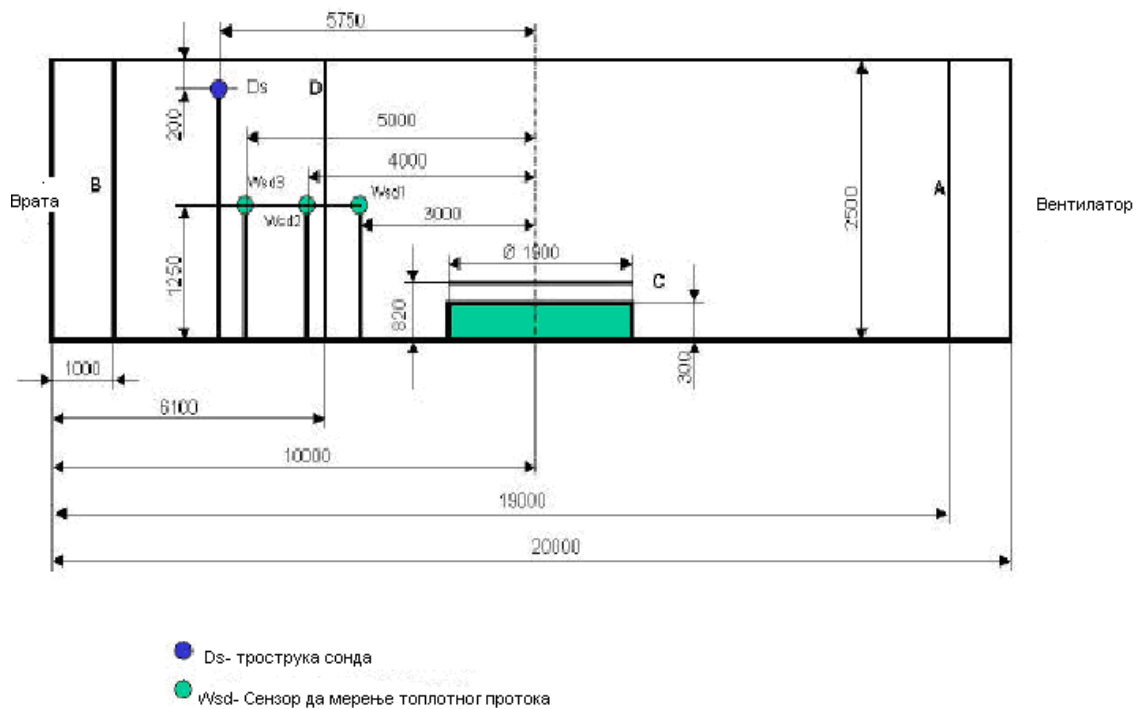


**Слика 5.3.** Поглед на празну тест просторију пожарног тунела Идф ЛСА (*LSA Idf*) [Kohl, 2003].

Прави тест објекат је пројектован и изграђен за експеримент. Експериментални простор је био подељен на неколико нивоа мерења. На слици 5.5. је шематски приказ поставке експеримента приказане у пресецима по дужини. Димензије су у милиметрима на скицама.



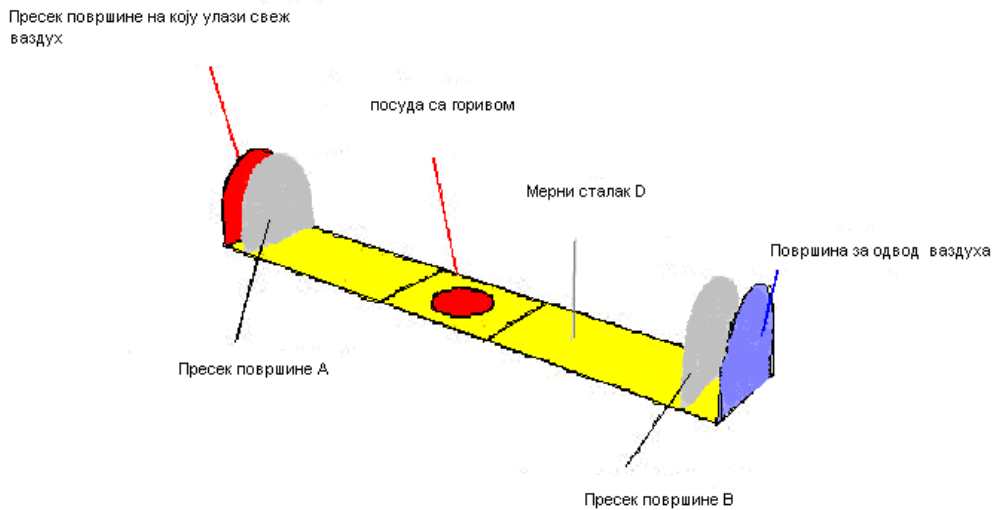
Слика 5.4. Бочни изглед и изглед пресека пожарног тунела Идф ЛСА [Kohl, 2003].



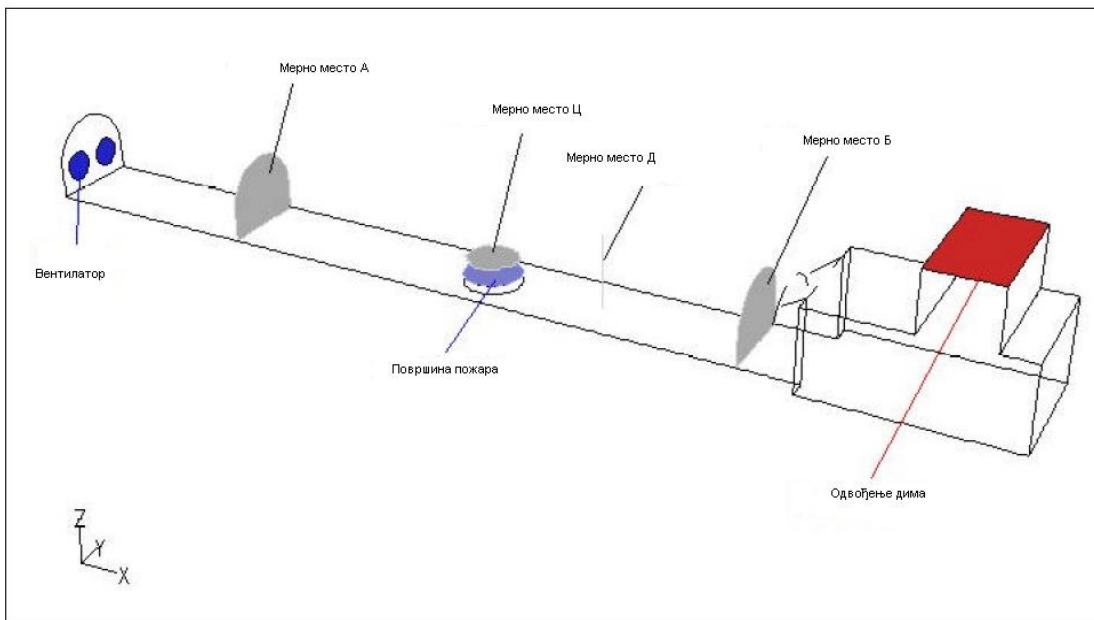
**Слика 5.5.** Шематски приказ поставке експеримента приказане у подужним пресецима [Kohl, 2003].

Експериментална просторија је била подељена на неколико мерних нива. Постављена су мерна места обележена са А, Б, Ц и мерно место Д на сталки. У средини тест тунела се налазила посуда са горивом од нерђајућег челика са пречником од 1,90 m. Брзине и температуре су мерене у тачкама на попречном пресеку мерних нивоа. Поред тога, у једној тачки је мерен топлотни флуks и концентрација гасова од прододуката сагоревања.

Сви сензори су били постављени тако да су врхови сензора окренути супротно од очекиваног главног правца протока. Изузетак су троструке сонде за мерење концентрације појединих гасова, које су из техничких разлога постављене под правим углом у односу на правац протока гасова.



Слика 5.6. Маргине и мерне површине приказани на моделу [Kohl, 2003].

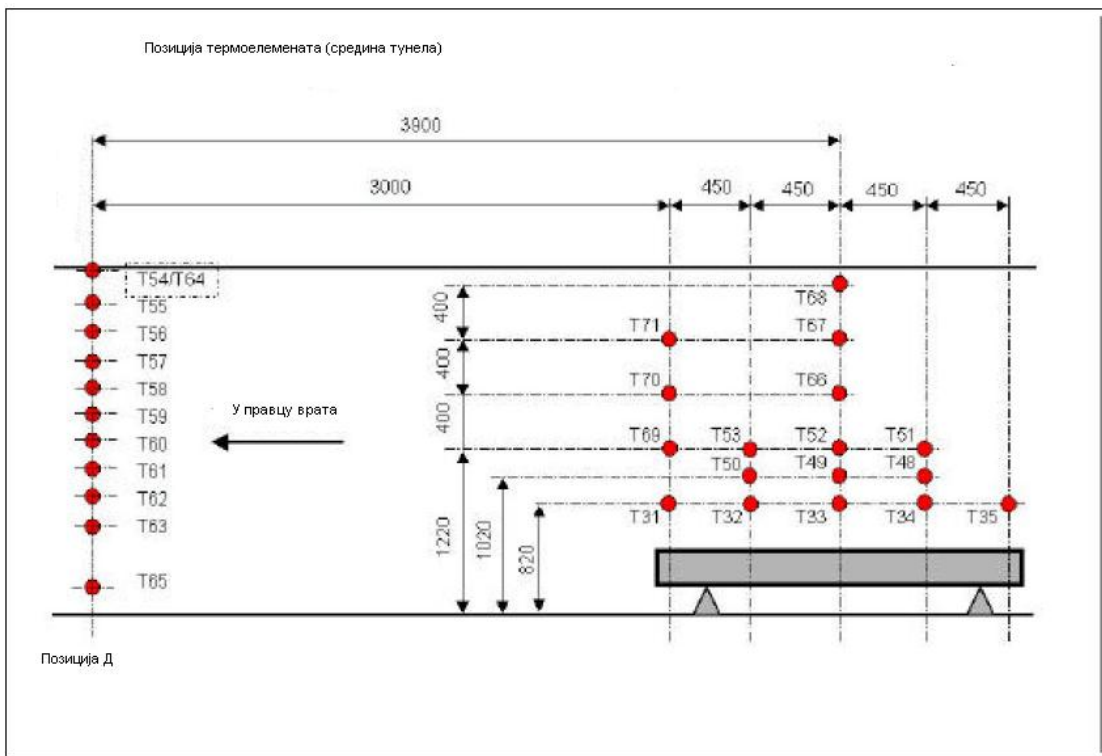


Слика 5.7. Маргине и мерне површине приказани на моделу пожарног тунела [Kohl, 2003].

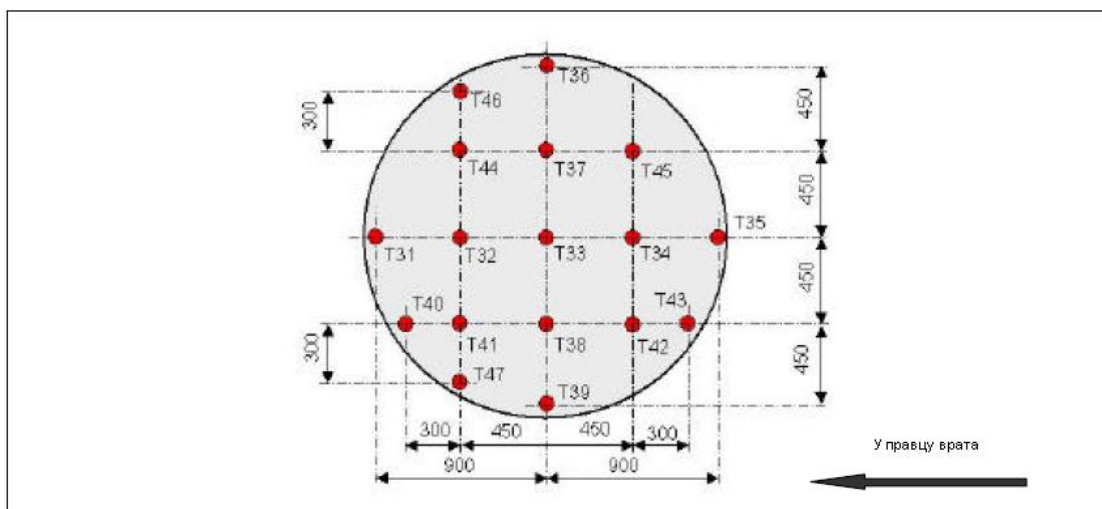
### 5.3. Мерење температуре

У мерним равнима од А до Ц су мерене температуре термопаровима (термоелементима) по целом попречном пресеку. Поред тога, постављена је мерна мрежа подужно изнад посуде са горивом, тако да се директно мери температура изнад запаљене посуде (Ц).

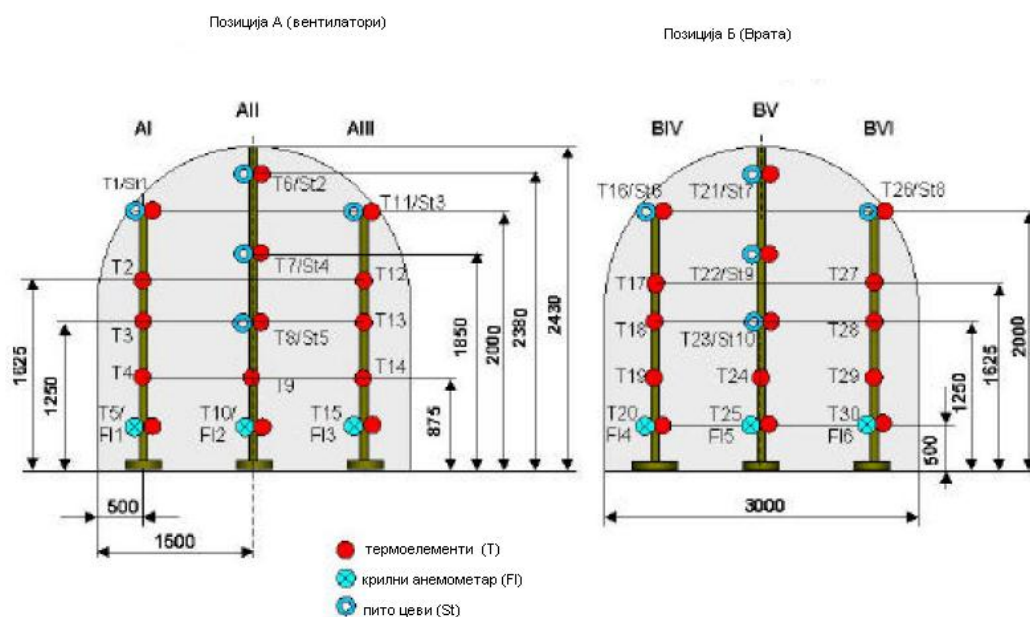
Осим тога, у централној равни канала мерила се температура на сталку Д, по висини. На сликама 5.8.,5.9. и 5.10. ове мерне конфигурације су приказане. Мерне тачке температуре су означене са "Т".



**Слика 5.8.** Шематски приказ распореда термоелемената у централном делу пожарног тунела, директно изнад посуде и на сталку Д. [Kohl, 2003].



**Слика 5.9.** Шематски приказ распореда термоелемената на мерној површини Ц [Kohl, 2003].



Слика 5.10. Приказ мерних тачака на мерним површинама А и Б [Kohl, 2003].

Температура се мери помоћу термопарова са изолацијом типа К ( $NiCr / Ni$ ) на месту индиректног мерења. На слици 5.11. су приказани термопарови који су коришћени. У експериментима су кориштени изоловани термопарови различитих произвођача са облогом пречника 1 mm и дужине 5 или 10 метара у зависности од локације.



Слика 5.11. Обложени термопарови [Kohl, 2003].

Термопарови задовољавају тачност II класе према DIN/ICE584. Опсег минералних изолованих термопарова се протеже од 233 К до 1573 К. Одступање за ове термопарове је  $\pm \max(0.0075 IT, 2.5 \text{ K})$ , а  $T$  је температура и мери у К. Брзина реакције  $T90$  је око 0,2s.

#### 5.4. Мерење протока топлоте

У пресецима по дужини пожарног тунела постављени су сензори за мерење протока флукса топлоте, модел 64-10-20 америчке компаније МЕДТЕРМ [MED] на различитим локацијама (мерне локације од  $Wds1$  до  $Wds3$  приказане су на слици 5.5.). Принцип мерења, на коме се базира сензор протока топлоте усваја принцип Гардона и приказан је на слици 5.12.

Слика на левој страни приказује инсталирани сензор протока топлоте монтиран на сталку (носачу) са уређајем за хлађење. Примењени сензори, бележе специфични топлотни проток до  $100 \text{ kWm}^{-2}$  ( $10 \text{ Wcm}^{-2}$ ) под скоро свим амбијенталним условима [MED] Тачност је  $\pm 3,0\%$ .



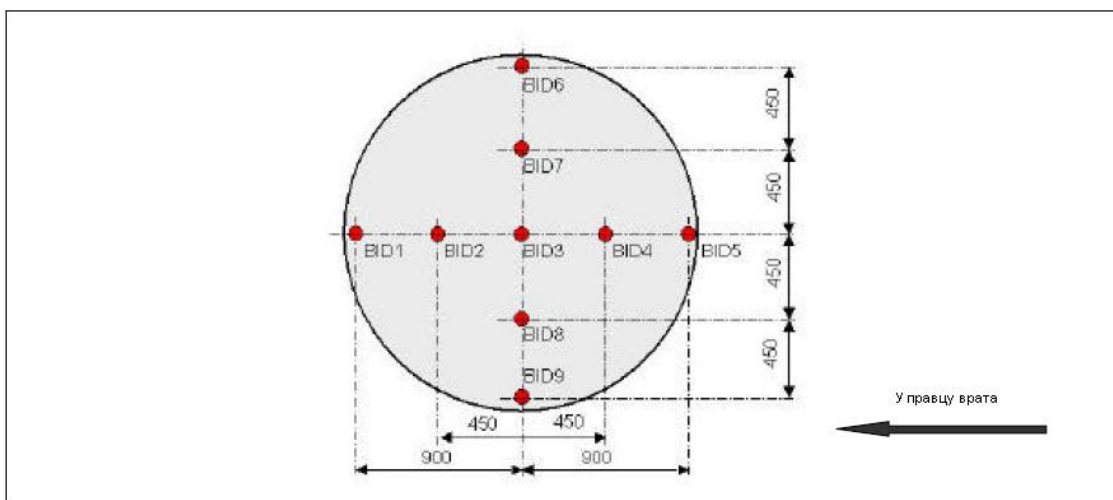
Слика 5.12. Сензор протока топлоте [Kohl, 2003]

#### 5.5. Мерење брзине гасова

На мерним пресецима А и Б мерена је и брзина протока у подужном смеру попречног пресека помоћу анемометра са крилцима и Прандтл Пито цевима



(слика 5.10.). На мерној површини Ц, мерена је брзина је управно на раван посуде са запаљивом течношћу (слика 5.9.) и то сондиама са двосмерним протоком [McCaffrey-Heskestad 1976]. На слици 5.13. је приказан распоред сонди на мерној површини Ц.



**Слика 5.13** Шематски приказ мерног система сензора за брзину на мерној површи Ц [Kohl, 2003]

На сликама су приказана места двосмерне сонде и означене са „*BID*“, крилни анемометар са „*Fl*“, а пито цеви са „*St*“.

#### Анемометар са пропелером

Анемометар са пропелером је погодан за мерење брзина гаса у температурном опсегу од 243 до 413 К. Они су се користили за очекиване ниске температуре да се утврди брзина улазног ваздуха (доње области мерних површина А и Б). Узети су ротори типа C1 9915 са мерним главама пречника од 22mm. Тачност анемометра износи према произвођачу  $\pm 1,5\%$  и дат је за  $40 \text{ ms}^{-1}$  [AHLBORN1]. Анемометар са пропелером је приказан на слици 5.14.





**Слика 5.14.** Анемометар са пропелером

Број окретаја пропелера је мерен преко магнетне индукције. Преко мерења фреквенције струје број обртаја је пренет линеарно и аналогно исказан.

Мана је ограничен температурни опсег за тестове пожара. Из тог разлога, за квалитативно одређивање правца протока вертикално постављених вунених нити у равни мерења Б инсталирана је видео камера којом је снимано. (слика 5.15.).



**Слика 5.15.** Надгледање протока у равни мерења Б [Kohl, 2003]

Пито цеви

Пито цеви су постављене у горње регионе мерних равни А и Б за мерење брзине гаса (слика 5.16.). То је тип Прандтл пито цеви FD 9912-97 Т [АНЛВОРН2].

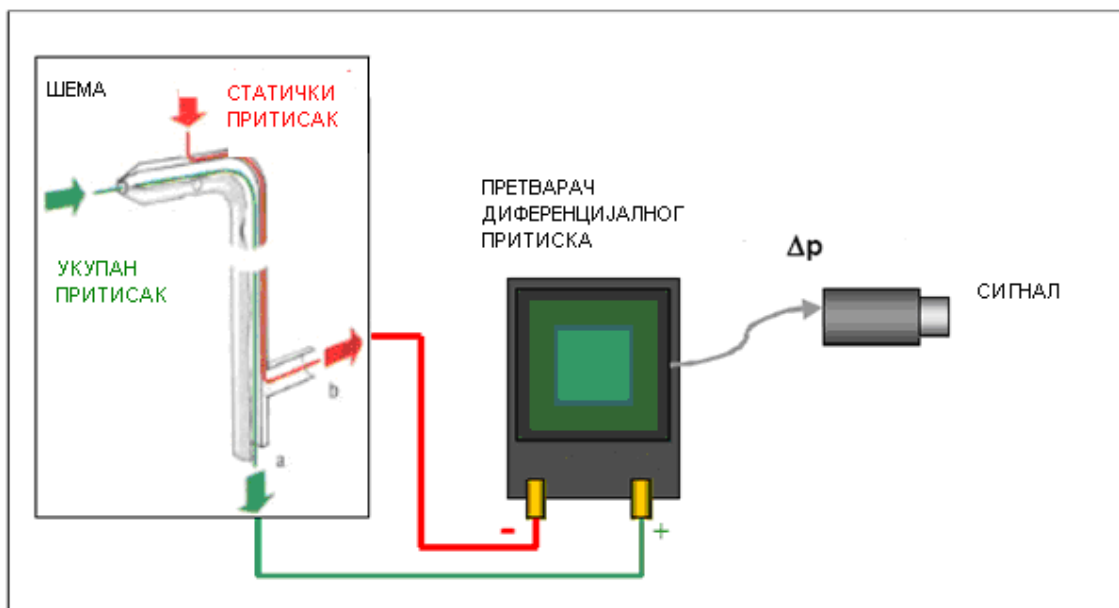
Пито цеви се користе условно, у зависности од материјала и дизајна, до температуре од 873 К. Користећи силиконско црево (оперативна граница 503К), ова граница се смањује.



Слика 5.16. Прантл пито цев [Kohl,2003]

Коришћењем довољно дугих пито цеви, могуће је мерење брзине врелих гасова и у нижим деловима.

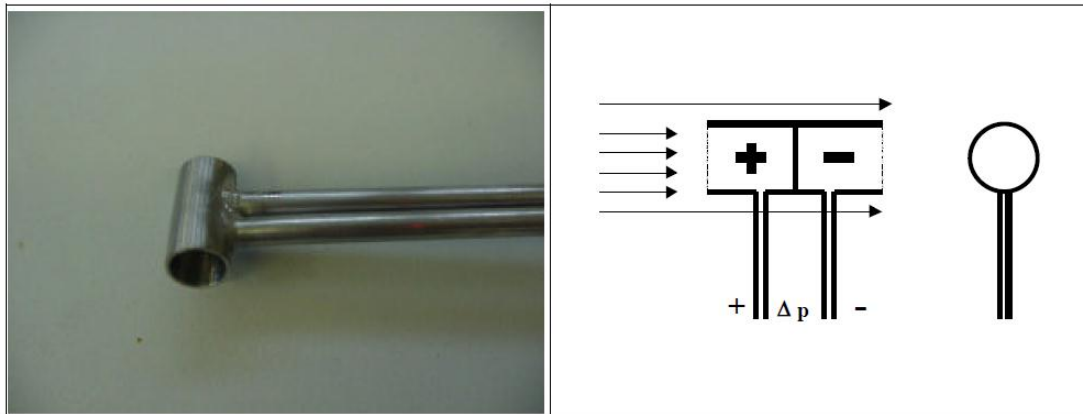
Пито цеви мере само у једном смеру, тако да је у тестовима пожара, само једна векторска компонента снимљена. Принцип мерења пито цеви је приказан на слици 5.17.



Слика 5.17. Принцип мерења пито цеви [Kohl, 2003]

## Двосмерне сонде

За мерење протока врелих гасова, поготово за одређивање брзине запаљених гасова, користе се двосмерне сонде (слика 5.18.).



Слика 5.18. Двосмерна сонда [Kohl, 2003]

Сонде су у потпуности израђене од нерђајућег челика. Оне раде као пито цеви по принципу диференцијалног притиска, али им је геометријски облик модификован и поједностављен. На слици се види оперативни принцип сонде. Показују много мању тенденцију да се зачепе отвори од чађи и продуката сагоревања у поређењу са пито цевима. Вредности су мерене аналогно, за Пито цеви уз коректуру према високим температурама гаса а на бази разлике притисака.

## 5.6 Мерење масе горива

Одређивање губитка масе горива за време теста пожара је реализовано са вагом за брзину сагоревања. За ово су постављене три мерне ћелије, на посуди са горивом, типа КА 2000. Тачност сваког мерења  $\pm 1\%$ .



**Слика 5.19.** Мерне ћелије типа КА 2000 [Kohl, 2003]

Резултати мерења претвараача силе су забележени појединачно и у програму прикупљања података пренети на мерену вредност.

### **5.7. Прикупљање података, видео записа и информација о времену**

Током прикупљања података коришћен је аналогни систем Аутолог 2100 [Peekel] у виду мобилне техничке лабораторије за пожарна испитивања МОБЛАБ на ИДФ ЛСА. Лабораторија може да прати истовремено 150 различитих промењљивих података. То може бити свако физичко мерење или хемијска анализа података, ако су константни струја и напон сигнала обезбеђени. Резултати се приказију сваких 5s. Узорковање на краће време није било могуће из техничких разлога. Прикупљање података је вршено помоћу интегрираног дигиталног волтметар кад се појави сметња. На неким местима пикови напона су елиминисани.

#### **Видео документација**

Експерименти су такође праћени ендоскопском видео камером [Digital] која једина може да ради у условима високих температура (слика 5.20.). Она може да се користи у пламену и на температурама амбијента и изнад  $1000^{\circ}\text{C}$ . Састоји се од минијатурне колор ЦЦД (CCD) камере, која је заштићена са цевима хлађених водом. Предњи објектив је заштићен компримованим ваздухом од честица током пожара. Добијени подаци преносе се на рекордер и монитор у мобилној лабораторији преко БНЦ (BNC) кабла

Друга с/в ЦЦД (*s/wCCD*) камера са даљинском главом је коришћена за праћење памучног предива у вертикали (види слику 5.13.). Она је изолована и постављена у близини тла у области где неће бити значајних температурних промена. Снимање је аналогно као слике ендоскопске камере.

#### Прикупљање метеоролошких података

Са метеоролошком станицом Моблаб, снимани су спољни услови у току теста пожара због могућег утицаја на развој пожара. Подаци су мерни 10 m изнад земље. Вредности које су мерене је температура, смер и брзина ветра, влажност и притисак. Са Метеоролошком станицом [Thies] снимљена су мерења, а приказана и сачувана помоћу софтвера *Anacompr Anavis*.



Слика 5.20. Ендоскопска камера [Kohl, 2003]

## Ехперимент

У табели 5.1. приказане су вредности ерксперимента. Од 1-6 су пробни тестови да би се одредила оптималан начин испитивања. Од 7-12 су праве вредности испитивања.

**Табела 5.1** Преглед експеримената са бензином (*SB*) и хептаном (*HP*) [Kohl, 2003]

Број теста	Гориво	Принудна вентилација
БВ01	10 <sup>l</sup> <i>SB</i>	без
БВ02	20 <sup>l</sup> <i>SB</i>	без
БВ03	60 <sup>l</sup> <i>SB</i>	са
БВ04	20 <sup>l</sup> <i>SB</i>	без
БВ05	40 <sup>l</sup> <i>SB</i>	без
БВ05	40 <sup>l</sup> <i>SB</i>	без
<b>БВ07</b>	<b>80<sup>l</sup> <i>SB</i></b>	<b>без</b>
<b>БВ08</b>	<b>80<sup>l</sup> <i>SB</i></b>	<b>без</b>
<b>БВ09</b>	<b>80<sup>l</sup> <i>HP</i></b>	<b>без</b>
<b>БВ10</b>	<b>80<sup>l</sup> <i>HP</i></b>	<b>без</b>
БВ11	40 <sup>l</sup> <i>HP</i>	са
БВ12	40 <sup>l</sup> <i>SB</i>	са

Као гориво за паљење пожара се користио бензин са тачком кључања 80/110 (*SB*) и хептан (*HP*). Бензин се састоји од посебне мешавине бензина са тачком кључања 353-383 К (80 и 110 °С), лаки бензин. Хептан има тачку кључања од 371 К (98 °С), која је постављена у интервалу између тачке кључања и тачке границе кључања бензина. Хептан је изабран као гориво, јер се у литератури често појављује описан као гориво. Тестови у великом ЕУРЕКА (*EUREKA*) пројекату су вршени са хептаном као горивом [FIRETUN 95].

За нумеричке симулације су као репрезентативни одабрани тестови од БВ07 до БВ10, јер су сви спроведени са природном вентилацијом и истом количином

горива, па им је самим тим и време трајања било приближно исто (бензин и хептан нису показали значајне разлике у понашању при пожару).

На слици 5.21. налази се примери теста пожара у датом тунелу.



Слика 5.21 .Снимак теста пожара [Kohl, 2003]

## 6. ПОСТАВКА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА

За математичко моделирање процеса пожара у тунелу, било је потребно обухватити физичку сложеност турбулених струјања флуида и процеса преношења топлоте, проблематику хемијских реакција, а посебно, због релативно високих температура гасова које се јављају при процесу сагоревања, и проблематику топлотног зрачења гасова.

### 6.1. Основне билансне једначине

**Основне билансне једначине** за случај неустаљеног струјања у нумеричком смислу нестишљивог флуида, имају следеће облике:

**осредњена једначина континуитета:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0, \quad (6.1)$$

**Рејнолдсова векторска једначина:**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_f S_{ij} + \tau_{ij}) + \rho F_i, \quad (6.2)$$

**и осредњена једначина енергетског биланса:**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j H) = U_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu_f \Psi_\mu(U_i) + \mu_f \Psi_\mu(u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_f \frac{\partial H}{\partial x_i} - \overline{\rho h u_i} \right). \quad (6.3)$$

Будућу да је ваздух, као основни медијум је сматран идеалним гасом, његова густина је одређена **једначином стања идеалног гаса:**

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (6.4)$$

а вредност специфичне енталпије дефинисана изразом:

$$H = c_p T. \quad (6.5)$$

У складу са **поопштеном и коригованом Бусинесковом (Bousinesq) хипотезом**<sup>1</sup>, која уводи појам турбулентне (вртложне) динамичке вискозности  $\mu_t$

---

<sup>1</sup> Бусинеск је 1877. године, предложио да се за струјања типа смицајног граничног слоја, по аналогији са Њутновом хипотезом о напонима који се при ламинарном струјању јављају у флуиду услед сила вискозности, Рејнолдсови напони при турбулентном струјању флуида опишу као:



повезујући Рејнолдсове напоне и тензор брзине деформисања  $S_{ij}$  и која за у нумеричком смислу нестишљива струјања Њутновских флуида гласи:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}. \quad (6.6)$$

полазна Рејнолдсова векторска једначина, сада моделирна се своди се на облик:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_t + \mu) S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] + \rho F_i, \quad (6.7)$$

Такође, при свим нумеричким симулацијама **функције вискозне дисипације у једначини енергетског биланса**,  $\mu_t \Psi_\mu(U_i)$  и  $\mu_t \Psi_\mu(u_i)$ , моделиране су помоћу турбулентне динамичке вискозности:

$$\mu_t \Psi_\mu(U_i) + \mu_t \Psi_\mu(u_i) = 2\mu_t S_{ij} S_{ij}, \quad (6.8)$$

**Вектора енталпије флукуационог тока**, у скаду са простом градијентном методом моделиран је као:

$$- \overline{\rho h u_i} = \frac{\mu_t}{Pr_h} \frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad (6.9)$$

што је омогућило да се једначина енергетског биланса моделира као:

$$\tau_{12} = - \overline{\rho u_1 u_2} = \mu_t \frac{\partial U_1}{\partial x_2}.$$

Укупни “напон” у флуиду, тако је могао да се опише као:

$$\sigma_{12} = (\mu_t + \mu) \frac{\partial U_1}{\partial x_2}.$$

Коефицијент  $\mu_t$  назван је динамичка турбулентна вискозност.

Услед немогућности дефинисања тачне релације за турбулентне напоне, уопштавањем ове хипотезе, дошло се до израза:

$$\tau_{ij} = - \overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) = \mu_t S_{ij},$$

који представља основну хипотезу на којој се, осим напонских, заснивају сви остали модели турбуленције. Показало се да је у случају двоједначинских модела, као најједноставнијих универзалних модела, ова хипотеза одржива само у флуидним токовима без изненадних промена тензора брзине деформисања, то јест у токовима који не дају повода за појаву неједнаких нормалних Рејнолдсових напона [Wilcox, 1988] (токовима без знатних закривљења струјница, без наглих промена попречног пресека, токовима без секундарних струјања, без одвајања граничног слоја, итд.)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j H) = U_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \rho a_f + \frac{\mu_t}{Pr_h} \right) \frac{\partial H}{\partial x_i} \right]. \quad (6.10)$$

### 6.1.2. $k - \varepsilon$ модел турбулентних напона

За затварање система једначина (6.1-6.10) и одређивање кинетичке енергије турбуленције употребљен је тзв. двоједначински  $k - \varepsilon$  модел турбулентних напона [Harlow-Nakayama, 1968, Launder-Spalding, 1974]. Овај универзални модел турбулентних напона изабран је због своје потврђене поузданости у предвиђању струјних поља, при струјањима Маховог броја значајно мањег од 1.

Као што му и име каже, модел је дефинисан са две допунске билансне једначине:

**једначином преношења кинетичке енергије турбуленције  $k$ :**

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \mathcal{P}_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \rho \frac{\mu_t g_i}{\sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \rho \varepsilon, \quad (6.11)$$

**и једначине преношења дисипације кинетичке енергије турбуленције  $\varepsilon$ :**

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varepsilon) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mathcal{P}_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} \rho \frac{\mu_t g_i}{\sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]. \quad (6.12)$$

У горе написаним једначинама, у складу са стандардним начином означавања са  $S_{ij}$  је означен тензор брзине деформисања:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad (6.13)$$

док је са  $\mathcal{P}_k$  означен члан стварања кинетичке енергије турбуленције услед деформисања осредњеног тока:

$$\mathcal{P}_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}. \quad (6.14)$$

Рејнолдсови напони, моделирани су на основу Бусинескове хипотезе о турбулентним напонима,

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (6.15)$$

при чему је динамичка турбулентна вискозност  $\mu_t$  одређена изразом:

$$\mu_t = (C_D C_\mu) \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (6.16)$$

Будући да је вредност молекуларне дифузивности дима у ваздуху, у односу на турбулентну (моларну) дифузивност била занемарљиво мала, она је и у прорачуну занемарена.

Вредности емпиријских константи овог модела, заједно са вредностима Прандтловог (за енталпију), односно Шмитовог турбулентног броја дати су у табели 6.1.

Табела 6.1: Емпиријске константе  $k-\varepsilon$  модела турбулентних напона

$Pr_k$	$Pr_\varepsilon$	$C_D C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$\kappa$	$Pr_h$	$Sh_t$
1,0	1,314	0,09	1,44	1,92	1,0	0,41	0,41	0,81

Независно од  $k-\varepsilon$  модела турбулентних напона, а уобичајено за двоједначинске моделе турбулентних напона, вектор концентрације дима флукутирајућег тока, моделиран је у складу са принципима прости градијентне методе:

$$-\overline{\rho c u_i} = \frac{\mu_t}{Pr_h} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i}. \quad (6.17)$$

Будући да се оба флуида, и ваздух и димни гасови могу сматрати идеалним гасовима, односно да се њихова смеша, без обзира на удео појединих компоненти могла третирати као идеалан гас, за одређивање струјних и температурних поља и поља концентрације дима, употребљен је тзв. метод маркирања скаларне промењиве.

За (молекуларну) вискозност ваздуха предпостављена је квадратна зависност од термодинамичке температуре:

$$\mu_t = -4,9468 \cdot 10^{-6} + 4.5839 \cdot 10^{-8} \cdot T + 8.0974 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 \text{ m}^2/\text{s},$$

а за специфични топлотни капацитет ваздуха при сталном притиску, односно његову топлотну проводност узето је да има сталне вредности,  $c_p = 1004 \text{ J}/(\text{kg K})$ ,

$$\lambda_t = 2,63 \cdot 10^{-2} \text{ W}/(\text{m K}).$$

### 6.1.3 Модел великих вртлога (*Large Eddy Simulation Model*)

Модел великих вртлога (*Large Eddy Simulation Model*) укључен је у процес прорачуна, као неопходност условљену потребом симулације процеса сагоревања, односно испуњавања услова неопходног за употребу модела устаљених и неустаљених ламинарних пламенова (*the Steady Laminar Flamelet model* и *the Unsteady Laminar Flamelet model*).

Због тога су све симулације вршене уз филтрацију струјања, раздвајањем насталих виртуелних вртлога на велике и мале. Критеријум величине вртлога у свакој симулацији био условљен густином задате просторне мреже и дужином задатих временских корака, тј. величином одговарајуће контролне запремине и прорачунским временом у коме се посматрају две узастопне промене. Тиме је омогућено да се у спрегнутом прорачуну, за одређивање кретања великих вртлога користе директно Навије-Стоксове (*Navier-Stokes*) једначине, а за кретање малих вртлога користи  $k - \varepsilon$  модел турбулентних напона.

Свака промењљива била је филтрирна у складу са изразом:

$$\Phi(t, x) = \int \int_V \tilde{\Phi}(t', x') G(t - t', x - x') dt' dx', \quad (6.18)$$

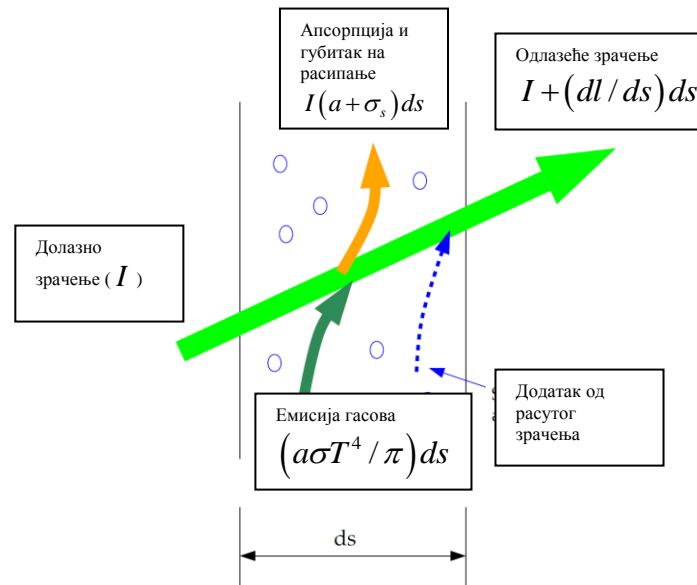
где је  $V$  просторни домен, а  $G$  функција филтрације која одређује размеру вртлога [Ansys Fluent Theory Guide, 2009].

### 6.1.4 Модел топлотног зрачења

Због високих температура продуката сагоревања које настају у анализираном процесу сагоревања, а ради повећања тачности нумеричког прорачуна, поред уобичајеног моделирања конвективног преношења топлоте, нумеричким прорачуном обухваћен је и феномен размене топлоте зрачењем.

**Основна билансна једначина** за описивање преноса топлоте зрачењем за флуид (супстанцу) – процесе апсорције, емисије и рефлекције за позицију дефинисану вектором положаја  $\vec{r}$  а у правцу  $\vec{s}$  гласи:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^2}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (6.19)$$



Слика 6.1. Пренос топлоте зрачењем [Ansys Fluent Theory Guide, 2009]

Нумерички прорачун вршен је под претпоставком да коефицијент апсорпције  $a$  и кофицијент рефлексије  $\sigma_s$  имају сталне величине. Према препоруци, претпостављено је да вредности ових коефицијента износе  $a = 0,92$  и  $\sigma_s = 0,85$  [Ansys Fluent Theory Guide, 2009].

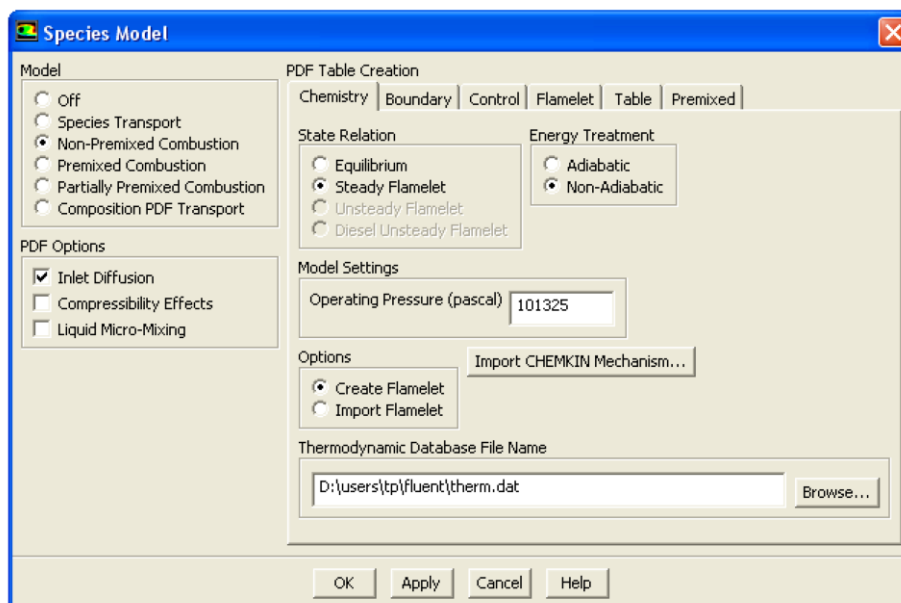
Са циљем решавања билансне једначине за описивање преноса топлоте зрачењем (6.19) коришћен је тзв. **модел Дискретних Ордината (МДО)**. Овим моделом, јеначина (6.19) преводи се у тзв. билансну једначину за интезитет зрачења  $I(\vec{r}, \vec{s})$  за просторне координате  $(x, y, z)$ .

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^2}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (6.20)$$

Интеграција последњег члана у једначини врши се за коначан број просторних углова - дискретних ордината. На тај начин, омогућено је да се нумерички поступак решавања билансне једначине за описивање преноса топлоте зрачењем (6.20) буде идентичн оном које се користи за решавање и свих осталих билансних једначине.

### 6.1.5 Модел сагоревања

Ради дефинисања граничног услова којим би се обухватио утицај који на струјно и температурно поље има процес сагоревања, најпре је искоришћен приступ понуђен софтверским пакетом ФЛУЕНТ 13. За случај сагоревања претходно неизмешаног горива и оксиданта, што обухвата и тзв. пожаре са површи (*pool fires*), употребљена су сва три модела које нуди овај софтверски пакет – модел сагоревања за случај да процес одвија у хемијској равнотежи, затим „близу“ хемијске равнотеже, тзв. модел устаљених ламинарних пламенова (*the Steady Laminar Flamelet model*), или ако значајно одступа од хемијске равнотеже тзв. модел неустаљених ламинарних пламенова (*the Unsteady Laminar Flamelet model*), слика 6.2.



Слика 6.2. Приказ избора модела сагоревања у Флуенту 13

Заједничко за све наведне моделе је да се аналитика процеса сагоревања своди на решавање биласних једначина пасивне скаларна величине  $f_i$ , тзв. масеног удела  $i$  – те фракције горива у смеши или само  $i$  – те фракције смеше:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \bar{f}_i) = + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \Gamma_f \frac{\partial \bar{f}_i}{\partial x_k} \right) + S_m + S_{\text{user}}, \quad (6.21)$$

где је фракција смеше дефинисана као однос разлике масених протока  $\phi$ :

$$f_i = \frac{\phi_i - \phi_{i,ox}}{\phi_{i,gorivo} - \phi_{i,ox}}, \quad (6.22)$$

односно моделиране билансне једначине средње вредности квадрата њене флукуације  $\overline{f_i'^2}$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f_i'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \overline{f_i'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_f \frac{\partial \overline{f_i'^2}}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t (\overline{f_i})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f_i'^2} + S_{user}. \quad (6.23)$$

Вредности константи дефинисних моделом износе  $\sigma_t = 0,85$ ,  $C_g = 2,86$ ,  $C_d = 2,00$  ( $\Gamma_f = \mu_t / \sigma_t$ ).

Такође, заједничко за ове моделе, а што потенцијално представља и њихову главну предност али и њихов главни недостатак, је да се стехиометрија хемијских реакција, односно термохемијске последице процеса сагоревања, за сваку врсту горива, одређују помоћу табеларних података и то у предпроцесном делу прорачуна. На овај начин, проблем сагоревања је поједностављен и сведен на проблем мешања, а и тешкоће у вези са затварањем нелинеарних чланова брзине реакција у попуности су превазиђене.

Приликом коришћења модела устаљених и модела неустаљених ламинарних пламенова, коришћени су предлози за зонирање простора у зони пламена и дефинисање потребних параметара за коришћење модела устаљених и меодела неустаљених ламинарних пламенова описаних у литератури [Vela, 2009].

### 6.1.6 Нови експериментално-нумерички модел

Након већег броја спроведених симулација, користећи сва три понуђена модела, поређењем добијених нумеричких и експерименталних резултата, и њиховом анализом, прихватљиво добре резултате показао је једино модел устаљених ламинарних пламенова (*the Steady Laminar Flamelet model*).

Резултати ових симулација дати су у прилогу 2 и 3.

Међутим, чак и за случај спровођења симулација модела устаљених ламинарних пламенова, резултати нумеричких симулација показали су знатна одступања од експерименталних резултата. Највећа одступања примећена су у равни непосредно изнад базена са горивом (мерно место Ц), као и у простору

тунела иза пламена (мерно место Д и Б) и то у периоду након почетног развоја пожара, тзв. периоду прве стагнације пожара (период 40 до 120-те секунде).

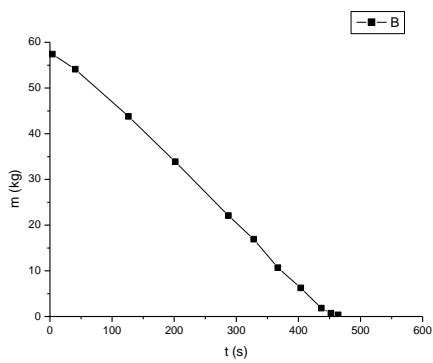
Због сложености и комплексности коришћеног математичког-нумеричког апарата, али и табеларног приступа самом термохемијском процесу, могућност предвиђања последица које ће изазвати корекције употребљених модела била је веома ограничена. Ипак, процедура тражења корекције која ће довести до тачнијег предвиђања, а у складу са препорукама из литературе [Sivathanu–Faeth, 1990, Vela, 2009], најпре је тражена путем одговарајућих корекција појединих коефицијената у претходно примењеним моделима. Међутим, и поред спроведених бројних нумеричких симулација, најчешће суочени са проблемом конвергенције решења, а затим и добијања резултата са још већим одступањима од експерименталних, од ове идеје се одустало и приступило потпуно другачијем концепту тражења побољшања.

Уместо тзв. табеларног приступа и посредног увођења стехиометријских једначина у прорачун, примењен је далеко једноставнији метод, заснован на пропорционалности ослобођеног топлотног протока током процеса сагоревања и масе сагорелог горива.

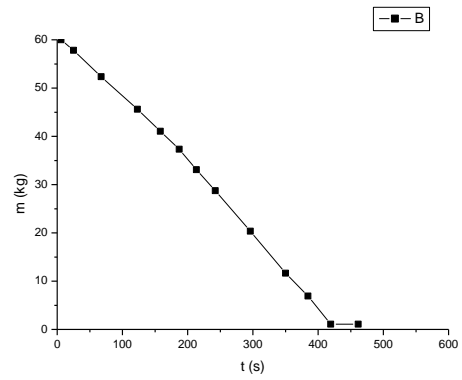
Као основа за овакав приступ посужиле су експериментално установљене вредности кинетике сагоревања, тј. промене масе горива у базену током вршења експеримента (слика 6.3.).

Да би ови резултати могли да се користе, било је неопходно користити моделирање сагоревања за случај да се процес одвија у хемијској равнотежи, а одговарајућу зависност ослобођене количине топлоте од измерене брзине смањивања масе горива у базену, било је потребно припремити у виду табеле и у одговарајућем формату и унети у програм (слика 6.4.).

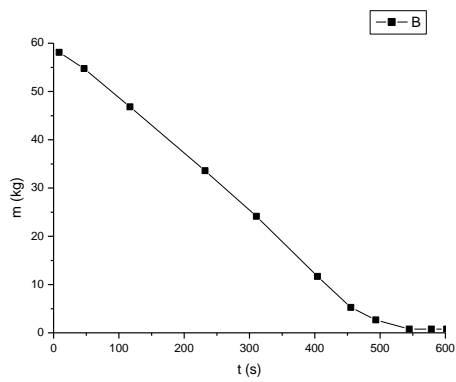




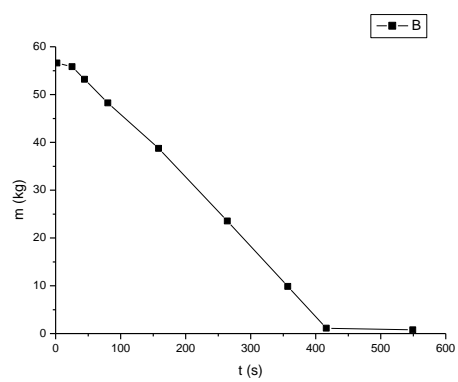
1.



2.

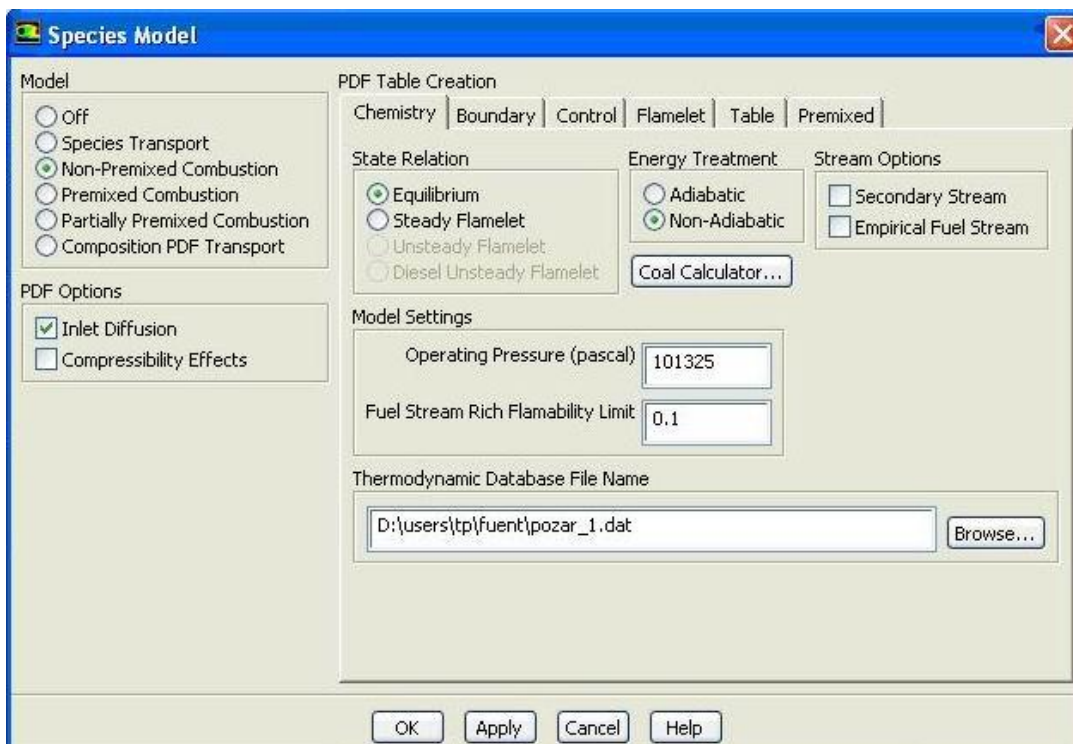


3.



4.

Слика 6.3. Промене масе горива у посуди током експеримента

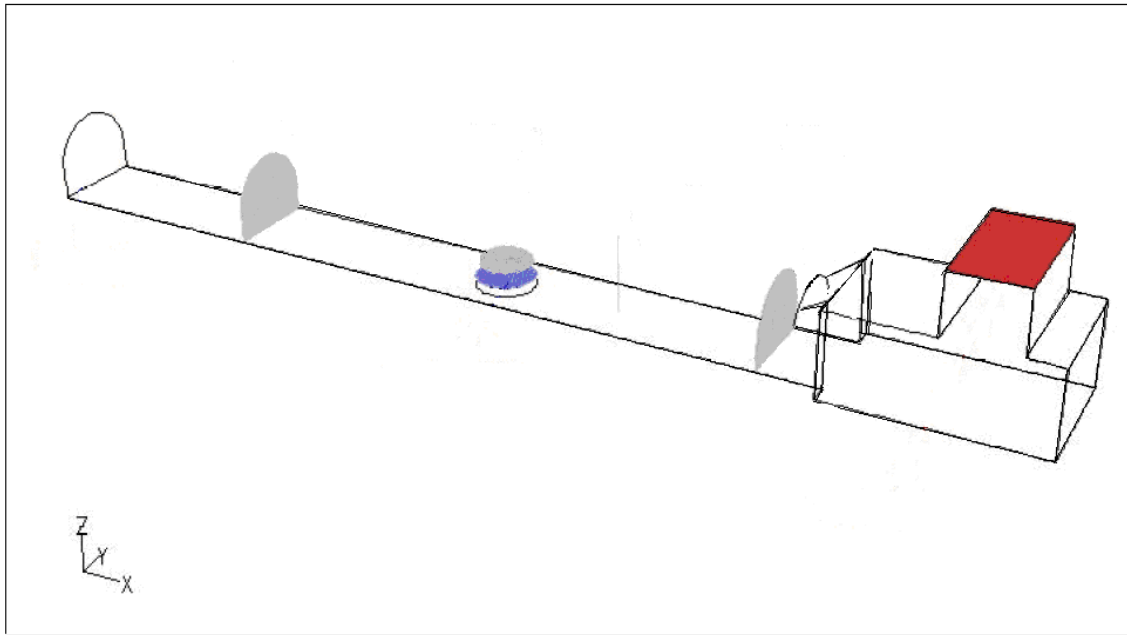


Слика 6.4. Приказ корекције модела сагоревања коришћењем експериментално установљеног граничног услова

## 6.2 Домен интеграције и гранични услови

### 6.2.1 Геометрија домена интеграције

Домен интеграције, приказан на слици 6.5., представљао је унутрашњу контуру експерименталног тунела Института за пожарна испитивања Сашен-Анхалт у Хејротсбергу, Немачка. Поред приказаних димензија основних контура тунела, на слици су приказани и положаји основних граничних површи: улаз у тунел, излаз из тунела, и положај и димензије посуде са горивом.



**Слика 6.5.** Домен интеграције - унутрашња контура експерименталног тунела Института за пожарна испитивања Сашен-Анхалт у Хејротсбергу, Немачка [Kohl, 2003]

### 6.2.2 Гранични (просторни и временски) услови

Да би систем једначина, које чине основне билансне једначине (6.1-6.10) уз једначине које дефинишу одговарајуће турбулентне моделе (6.11-6.17), процесе зрачења топлоте (6.20) и процесе сагоревања (6.21-6.23) имао једнозначно решење, потребно је дефинисати и граничне услове.

На основу претпостављене геометрије домена интеграције, неустаљености проблема и елиптичке природе једначина преношења, граничне услове је потребно задати на месту: улаза флуидног тока (ваздуха) у домен интеграције (улаз у тунел), затим на месту контакта флуида са зидовима тунела (уз површину чврстог тела), на површима које представљају места излаза флуида (продуката сагоревања) из домена интеграције (излаз из тунела), као на граничној површи базена са горивом.

- **Гранични услови на месту улаза флуидног тока у домен интеграције (улаз у тунел)**

Будући да струјање ваздуха ни пре, а ни током пожара није било индуковано радом вентилатора, све симулације су вршене под препоставком да су у почетном тренутку брзине ваздуха на улазу у тунел, као и у целом простору тунела биле једнаке нули.

Како су у осталим тренуцима времена, почевши од тренутка паљења горива у базену, вредности променљивих на овом пресеку домена биле непознате, као гранични услов коришћен је тзв. услов “константног” притиска. Овај услов уствари представља задавање нултих извода у правцу нормале на излазну раван, тј. граничних услова друге врсте, за вредности свих зависно променљивих величина осим за вредности брзине нормалне на излазну раван, тј.:  $\partial\Phi/\partial x_2|_{izlaz} = 0$  и  $\partial\Phi/\partial x_3|_{izlaz} = 0$  ( $\Phi = k, \varepsilon, \omega$  и  $H$ ), те задавању вредности притиска једнаком притиску околине<sup>2</sup>  $P|_{izlaz} = P_{amb}$ . Вредности недостајућих брзина, на тај начин су посредно дефинисане преко вредности притиска.

Вредност специфичне енталпије флуида на уласку у тунел, у складу са униформним вредностима температуре флуида  $T_{ul} = T_{amb} = 293$  К, дефинисана је вредношћу  $H_{ul} = H_{amb} = 294,74$  kJ/kg.

- **Гранични услови на месту контакта флуида са зидовима тунела (уз површину чврстог тела)**

За задавање граничних услова уз плочу коришћен је модел “зидних” функција. Овај приступ, произашао је из Прандтлове теорије граничног слоја, то јест могућности постављања универзалних алгебарских функција, које независно

---

<sup>2</sup> Пошто се нумерички прорачун не спроводи у односу на апсолутне вредности притисака, него у односу на неку разлику притисака ( $P = P_{aps} - P_{ref}$ ), где је са  $P_{ref}$  означена вредност неког референтног притиска (који је у овом случају једнак притиску околине  $P_{ref} = P_{amb}$ ), онда се на излазном пресеку уствари задаје нулта вредност притиска  $P$ , што уствари дефинише да је на тој позицији притисак једнак притиску околине.

од струјања у осталом делу тока, дефинишу понашање променљивих у брзинском граничном слоју<sup>3</sup>. С обзиром да сви употребљени модели припадају класи модела за велике Рејнолдсове турбулентне бројеве, за одређивање вредности променљивих, односно њихових протока уз саму плочу, коришћене су “зидне” функције које важе за тзв. логаритамску области. Приказ ових граничних услова дат је у табели 6.2..

Што се тиче проблема простирања топлоте, зидови тунела сматрани су адијабатским површинама, емисивности  $\varepsilon = a = 0,92$ .

- **Гранични услови на месту излаза флуида из домена интеграције (слободне границе)**

Како су вредности променљивих и на излазним пресецима домена у потпуности непознате - за горњу равну излазне коморе тунела, као гранични услов коришћен је поново услов тзв. “константног” притиска. У складу са тим, као и за улазни пресек, вредности свих зависно променљивих величина осим за

---

<sup>3</sup> Зидне функције, то јест универзалне зависности распореда сведене брзине  $U^+$  у функцији сведеног растојања од површине чврстог тела  $y^+$ , формиране су на основу изучавања граничног слоја насталог при струјању флуида дуж равне плоче, односно струјању флуида кроз цев. У случају осредњене брзине флуида  $U$ , ове функције у складу са зонама брзинског граничног слоја који се формира при турбулентном струјању флуида су облика:

$$U^+ = y^+; \quad y^+ \leq 11,63 \quad (y^+ \leq 5); \quad \text{за зону вискозног подслоја}$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B; \quad 30 < y^+ < 400; \quad \text{за зону развијене зидне турбуленције или тзв. логаритамску област (\kappa = 0,42, за струјање кроз цев B = 5,5).$$

Сведена брзина и сведено растојање од површине чврстог тела, дефинисани су преко вредности тангенцијалног напона у флуиду на месту контакта са зидом  $\tau_w$ , тј:

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau}, \quad y^+ = \frac{U_\tau y_n}{\nu}, \quad U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}.$$

Због потешкоћа у дефинисању погодне зависности у прелазној области турбулентног граничног слоја,  $5 < y^+ \leq 30$ , ова област се у смислу задавања граничних услова домена интеграције обично избегава.

вредности брзине нормалне на излазну раван, дефинисане су да имају нулту вредност, тј.:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \Big|_{\text{izlaz}} = 0 \text{ и } \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \Big|_{\text{izlaz}} = 0 \text{ и } \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} \Big|_{\text{izlaz}} = 0 \quad (\Phi = k, \varepsilon, \omega \text{ и } H). \text{ Такође,}$$

вредност притиска задата је да буде једнака притиску околине  $P \Big|_{\text{izlaz}} = P_{\text{amb}}$ .

Вредности недостајућих брзина, на тај начин су посредно дефинисане преко вредности притиска.

**Табела 6.2.** Гранични услови уз површину чврстог тела

Променљива	Коришћен услов	Напомена
$U_1$	$U_1^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B$	$U_1^+ = \frac{U_1}{U_\tau}, y^+ = \frac{U_\tau y_n}{\nu}, U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$
$U_2$	$U_2 \Big _{x_3=0} = 0$	
$U_3$	$U_3 \Big _{x_3=0} = 0$	
$k$	$k = 0, \left( \frac{\partial k}{\partial x_3} \right)_{x_3=0} = 0$	
$\varepsilon$	$\left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} \right)_{x_3=0} = 0$	
$H$	$\frac{\partial H}{\partial x_3} \Big _{x_3=0} = 0$	Адијабатска површина

### 6.3. Поставка нумеричког проблема

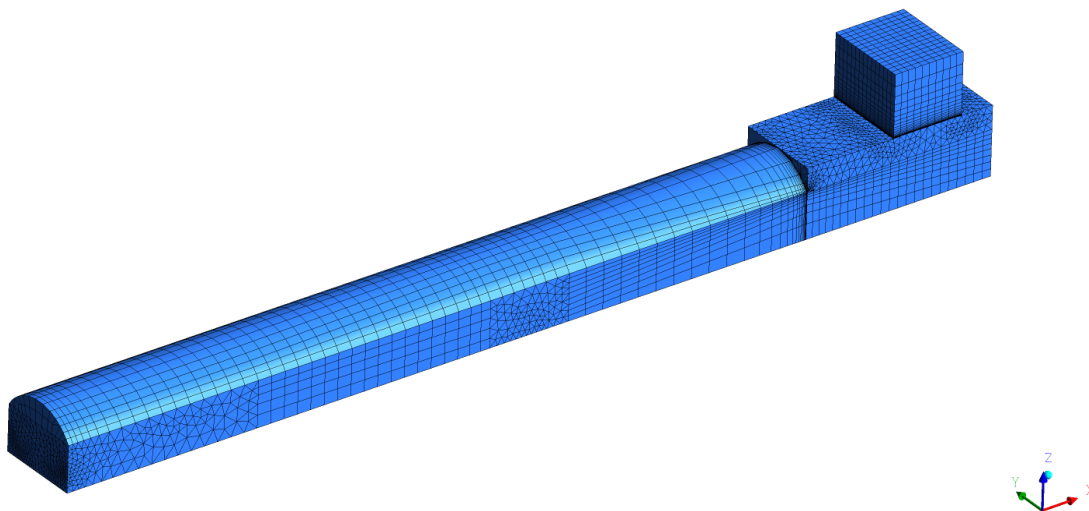
За нумеричко решавање постављеног математичког модела користи се метода коначних запремина. Ова метода подразумева да се интегралне свих диференцијалних једначина преношења (једначине континуитета, Рејнолдсове векторске једначине, једначине енергетског биланса, за сваки модел одговарајућих једначина преношења кинетичке енергије турбуленције  $k$  и њене дисипације  $\varepsilon$ , билансне једначине за описивање преноса топлоте зрачењем, као и билансних једначина  $i$ -те фракције смеше) изврши по једној произвољно

изабраној контролној запремини запремине  $V_p$ . Тим поступком омогућава се прелаз са диференцијалног на “коначни” облик ових једначина. На тај начин добија се систем од 6 алгебарских једначина преношења, које могуће дефинисати за сваку коначну малу запремину у струјном пољу – домену интеграције. Такође, величине стања у свакој контролној запремини повезане су и са три допунске конститутивне релације (моделом динамичке турбулентне вискозности, једначином стања идеалног гаса и везе између специфичне енталпије и температуре). Делјењем домена на  $n = 96\,871$  контролних запремина и дефинисањем над сваком запремином описаног система од  $5 + 5 = 10$ , алгебарских једначина, те изједначавањем протока између заједничких страница контролних запремина и успостављањем одговарајуће формулисаних граничних услова, могуће је израчунати вредности свих осам непознатих променљивих, у свакој контролној запремини домена интеграције.

Законитости, принципи и правила о методи коначних запремина могу се наћи у општој литератури која се бави овом проблематиком, нпр. [Patankar, 1980, Versteeg, 1995, Speziale, 1998] итд. Из тог разлога овде није приказан детаљан опис ове методе.

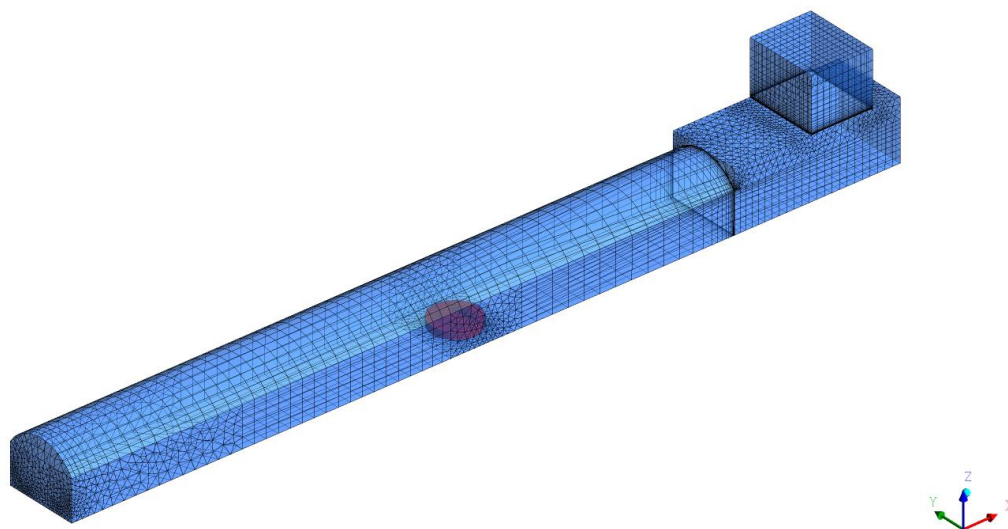
- **Генерисање мреже**

Због релативно једноставне геометрије простора тунела, дефинисање мреже извршено је у декартовом координатном систему, при чему је за формирање контролних запремина коришћен ФЛУЕНТ-ов генератор мреже ИЦЕМ ЦФД (ICEM CFD), а геометрија је генерисана у Ансисовом (*Ansys*) Воркбечу (*Workbench*). Због тога је дефинисање мреже контролних запремина подразумевало само задавање броја и локалног распореда контролних граница (мрежних равни), односно контролних запремина. Број мрежних равни је повећан, односно димензије контролних запремина су смањене у зонама у којима су се очекивали највећи градијенти разматраних величина (слика 6.6.).



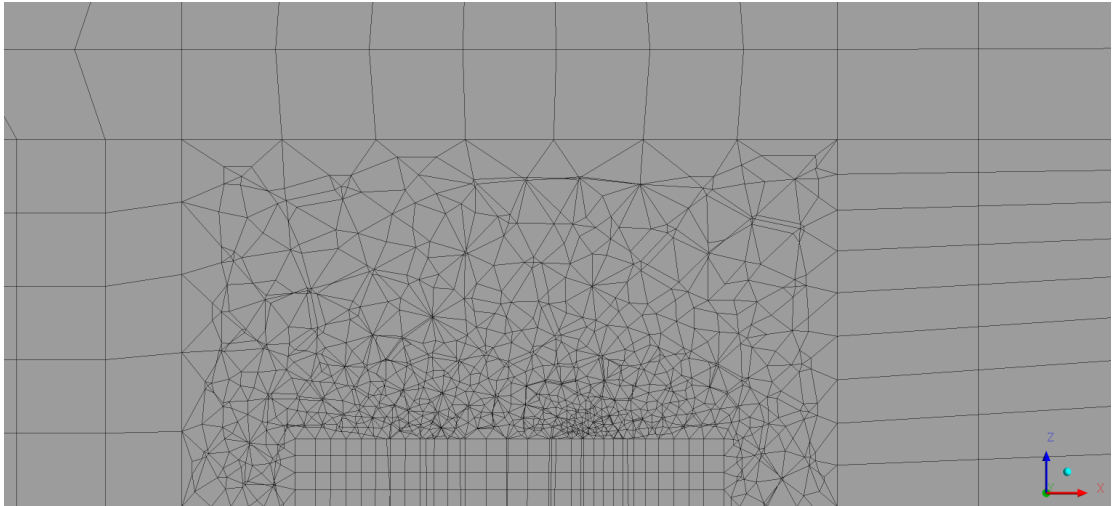
**Слика 6.6.** Спољна мрежа домена интеграције

Истовремено, како сви испитивани модели турбулентних напона припадају класи модела за велике Рејнолдсове турбулентне бројеве, мрежне равни морале су захватити зону тзв. логаритамске области граничног слоја, односно ући у зону бездимензионог растојања од зида мањег у интервали  $30 < y^+ < 400$ . Из тог разлога висина првог реда контролних запремина најближег зидовима тунела, тачније средишта контролних запремина, задата је тако да испуни овај услов.

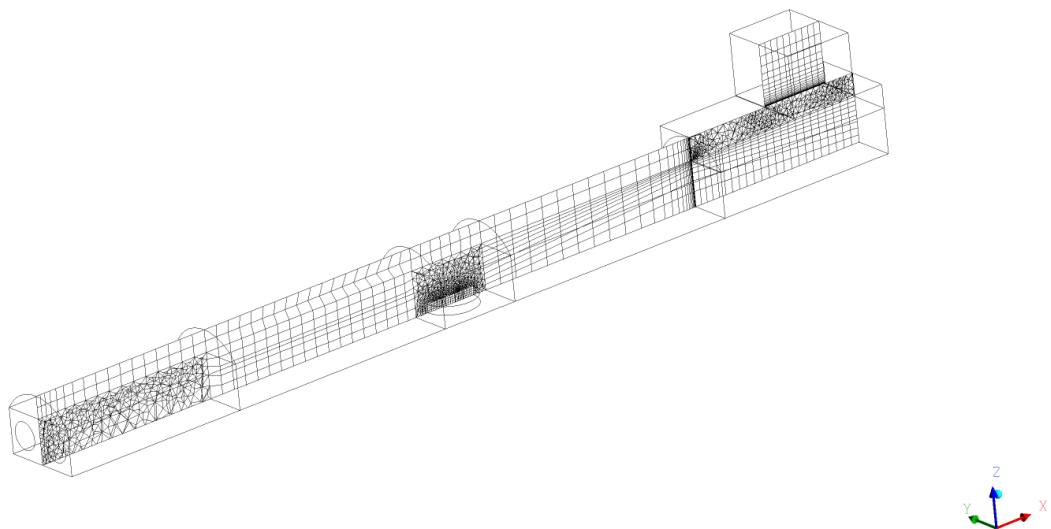


**Слика 6.7.** Транспарентна спољна мрежа домена интеграције



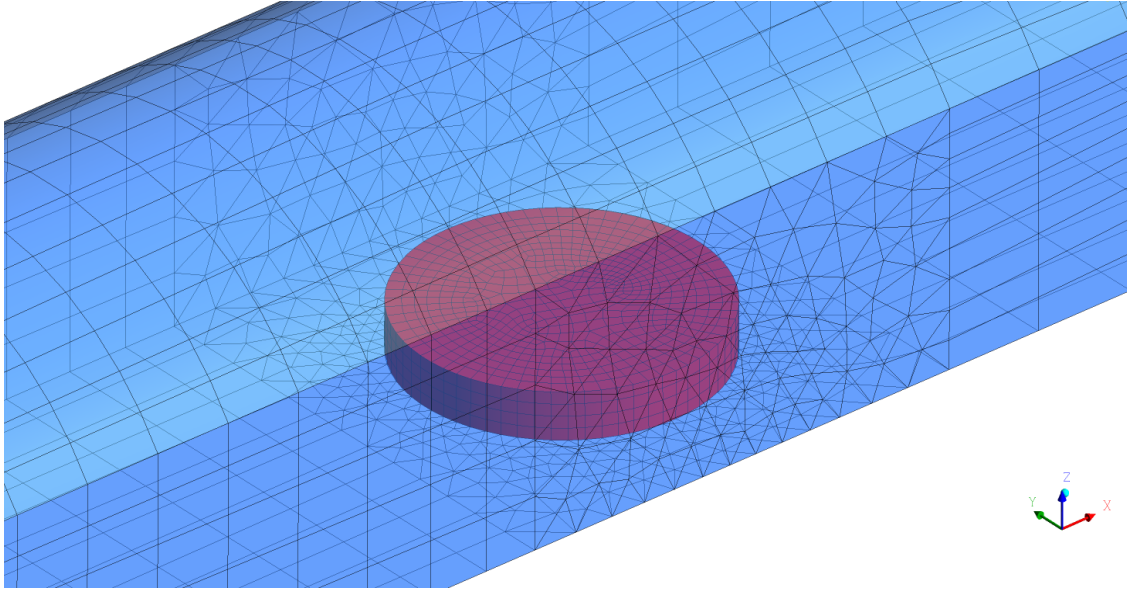


**Слика 6.8.** Распоред контролних запремина у близини посуде са горивом



**Слика 6.9..** Распоред контролних запремина у домену интергације (унутрашња мрежа)

Посебна пажња била је посвећена дефинисњу мреже изнад и око површи посуде са горивом, где је густина мреже повећана, како би појаве које се дешавају у овој зони могле детаљније и прецизније да се изучавају (слике 6.8.и 6.10.).



**Слика 6.10.** Распоред контролних запремина у близини посуде са горивом

Укупан број контролних запремина је 96871, контролних површина 13888, док је број чворова износио 31218. Мрежа је била комплексна и углавном се састојала од тетраедара чији је број износио 81412 и хексаедара 13249, а остатак су чиниле пирамиде 1942, призме 246 и клинови 268. На местима где су се очекивале промене, као што је посуда са горивом или доток ваздуха, врста мреже је мануелно изабрана, а остало је генератор мреже аутоматски изабрао и комбиновао у складу са остваривањем оптималних услова нумеричке симулације.

Даљим уситњавањем контролних запремина, односно повећањем њиховог броја, резултати симулација се нису мењали.

- **Временски корак**

Симулације је трајала колико и експеримент, тј. до 400 s. Временски корак износио 0,5 s. Курентов број током симулација није прелазео 0,76.

- **Избор итеративног поступка**

Као итеративни поступак за решавање спрегнутог система једначина које дефинишу понашање поље притиска и брзинско поље, употребљен је СИМПЛЕ алгоритам (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) [Patankar, 1980].

- **Избор диферентне шеме**

Велики градиенти скаларних величина и ралатино јако закривљење струјница у зони пламена, условило је елиптичку форму диференцијалних једначина. Као примерена за овакву врсту проблема, за одређивање вредности променљивих величина на страницама контролне запремине у функцији њихових вредности у чворовима, коришћена је хибридна диферентна шема.

- **Конвергенција решења**

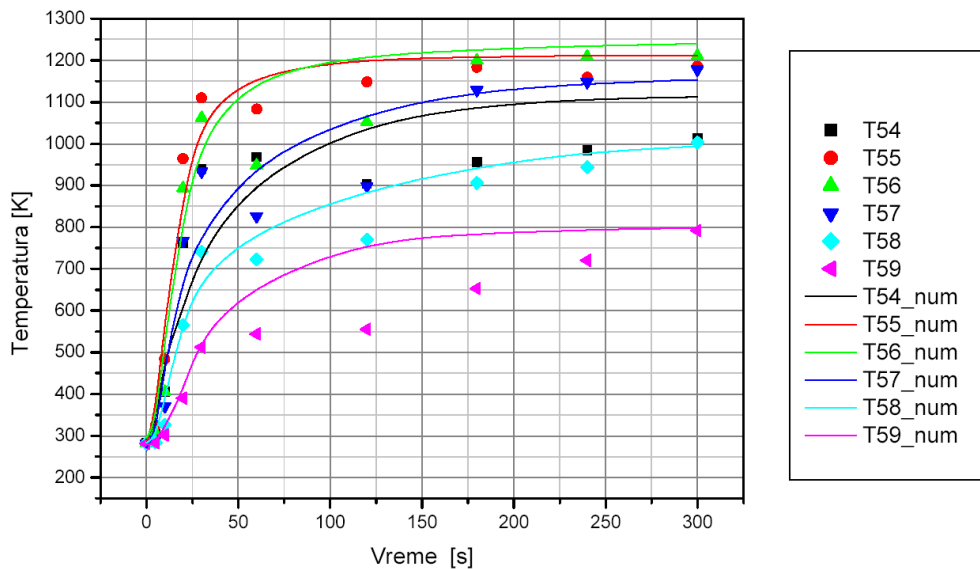
Добра конвергенција решења постигнута је за линеарно релаксиран притисак фактором  $\chi_p = 0,7$ , односно линеарно релаксирану сведену брзину дисипације фактором  $\chi_\omega = 0,1$ , затим релаксиране осредњене брзине и кинетичке енергије турбуленције фактором лажног временског корака  $\chi_U = \chi_k = 7,5 \cdot 10^{-3}$  и енталпије  $\chi_h = 3 \cdot 10^{-2}$ . Дисипација кинетичке енергије турбуленције није била релаксирана.

#### **6.4. Резултати нумеричких симулација**

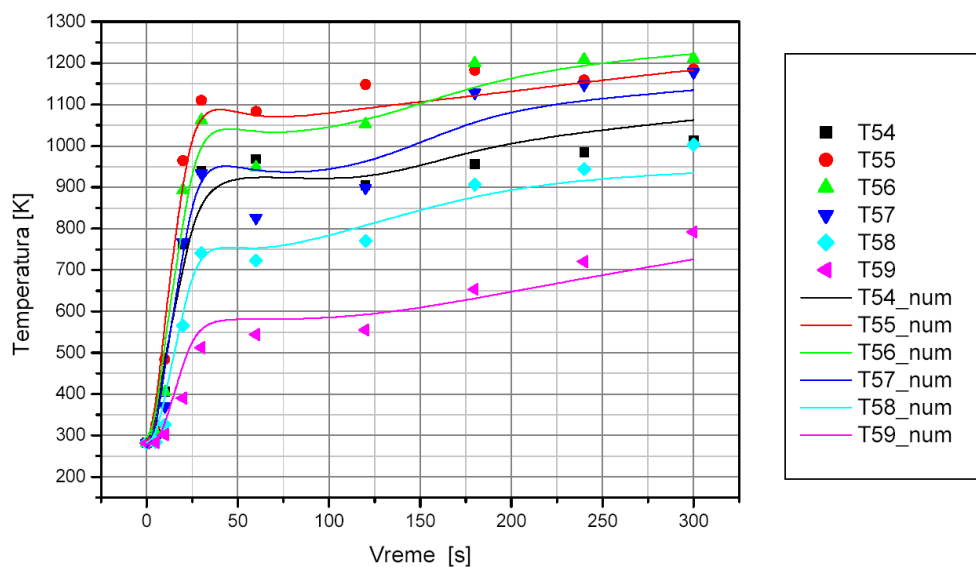
Након спроведене симулације са овако коригованим и надограђеним моделом сагоревања, и накнадним поређењем добијених нумеричких са експерименталним резултатима и установљавањем степена побољшања модела спроведеним  $\chi^2$  тестом, показало се да примењена модификација даје боље резултате од претходно коришћеног модела устаљених ламинарних пламенова.

Најзначајније побољшање остварено је у предвиђању температурног поља и то у простору изнад посуде са горивом (мерно место Ц), као и у простору тунела иза пламена (мерно место Д и Б) и то у периоду тзв. период прве стагнације пожара (период 40 до 120-те секунде), до које долази у простору око пламена због локалног недостатка кисеоника. На слици **6.11.** и **6.12.**, приказани су резултати предвиђања промене температурног поља, на мерном месту Д, првог

експеримента. На слици **6.11.** упоређени су експериментални резултати са резултатима добијеним нумеричком симулацијом основним пакетом ЦФД модела, а на слици **6.12.** коригованим пакетом модела.

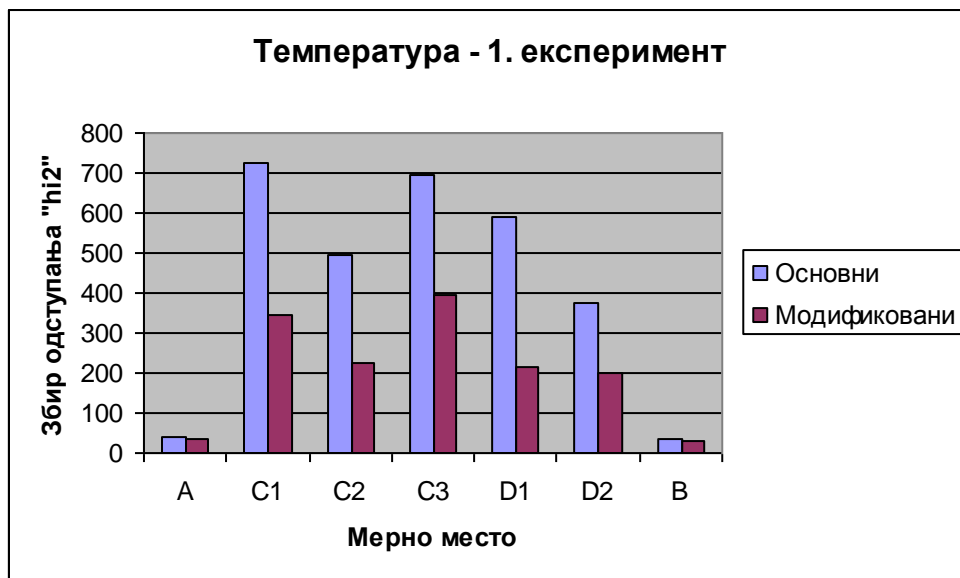


Слика 6.11. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д, коришћењем основног модела



Слика 6.12. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д, коришћењем коригованог система ЦФД модела

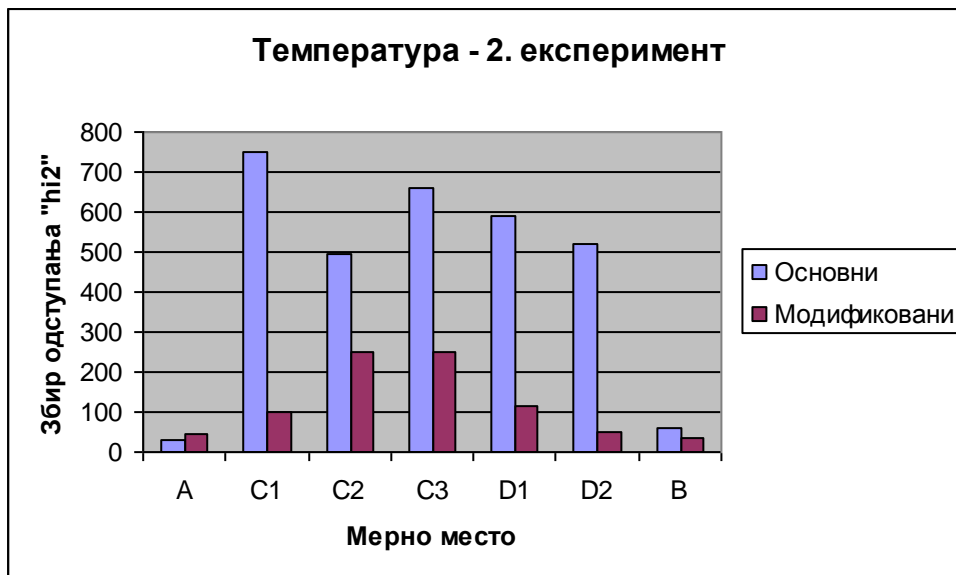
Збирна поређења одступања нумеричких од експерименталних резултата, за случај температурског поља, за сва четири експеримента, дати су у наставку. Поређење одступања је извршено кроз приказ суме вредности „ $\chi^2$ “ (одступања) по мерним местима, за случај основног и побољшаног нумеричког модела. За мерна места Д и Ц, због великог броја термопарова раздвојена су на по два односно три стуба.



Слика 6.13. Поређење одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 1. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

Табела 6.3. Одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 1. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

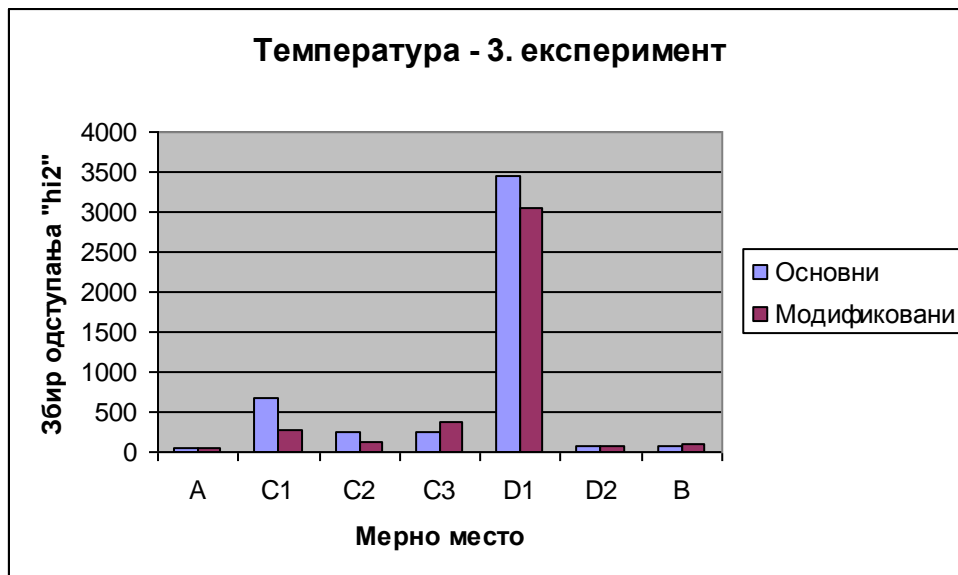
Раван	Основни	Модификовани
A	38,44177	35,66617
C1	725,6239	343,0917
C2	496,4777	227,2899
C3	693,9611	396,3164
D1	590,3853	214,0106
D2	377,2324	198,6486
B	32,98098	31,66578



**Слика 6.14.** Поређење одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 2. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

**Табела 6.4.** Одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 2. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

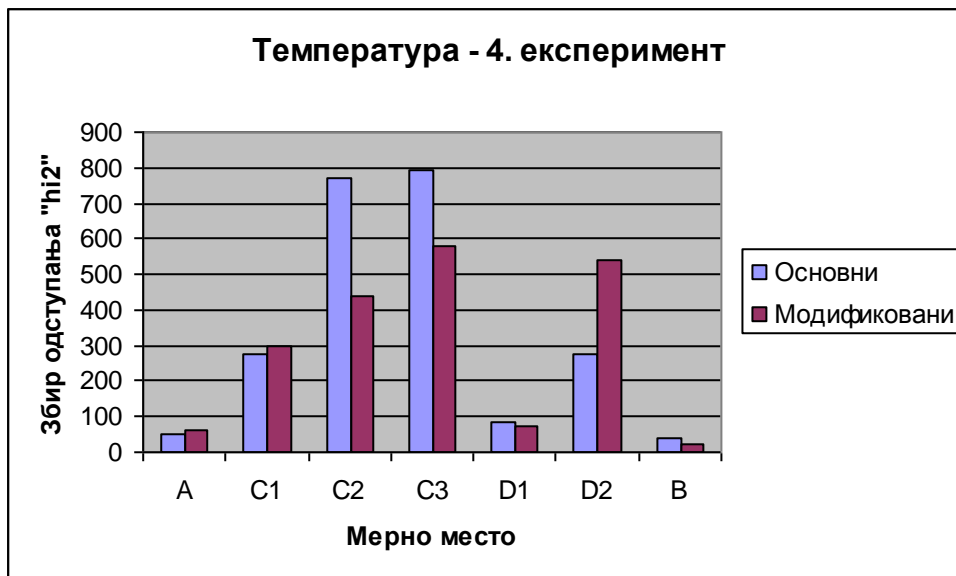
Раван	Основни	Модификовани
A	30,54686	43,65568
C1	752,4387	99,99857
C2	496,4777	248,0322
C3	657,5876	247,7115
D1	590,3853	113,0588
D2	519,3425	48,65594
B	60,33937	33,57361



**Слика. 6.15.** Поређење одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 3. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

**Табела 6.5.** Одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 3. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

Раван	Основни	Модификовани
A	46,45712	49,1722
C1	685,7799	263,6921
C2	253,3583	127,8907
C3	253,3583	373,1799
D1	3454,113	3041,927
D2	68,97722	78,31745
B	78,31745	94,44794



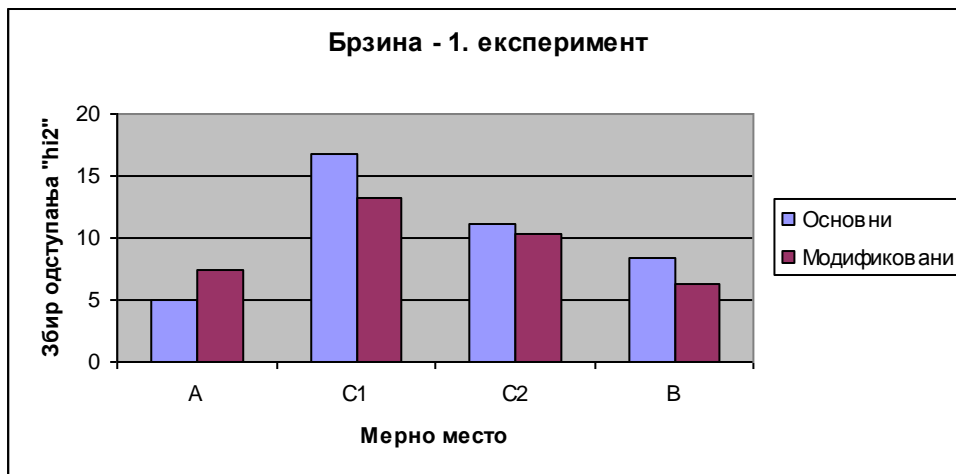
**Слика 6.16.** Поређење одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 4. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

**Табела 6.6.** Одступања вредности температура гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 4. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

Раван	Основни	Модификовани
A	50,20534	60,69113
C1	273,9982	296,9907
C2	769,7144	436,4794
C3	790,7349	577,5228
D1	84,00238	70,38939
D2	273,2809	542,1989
B	41,23369	22,86841

Са друге стране, одступања брзинских поља добијана било коришћењем основног, било модификованог модела показала су релативно мала одступања од експерименталних резултата. У већини случајева одступања нумеричких од експерименталних вредности налазе се у зони прихватљиво тачних резултата (за предпостављени услов прага значајности  $\alpha = 0,05$  и израчунате величине  $\chi^2$  имале су ниже вредности од граничних табеларних). То значи да даље кориговање математичког модела више није било неопходно.

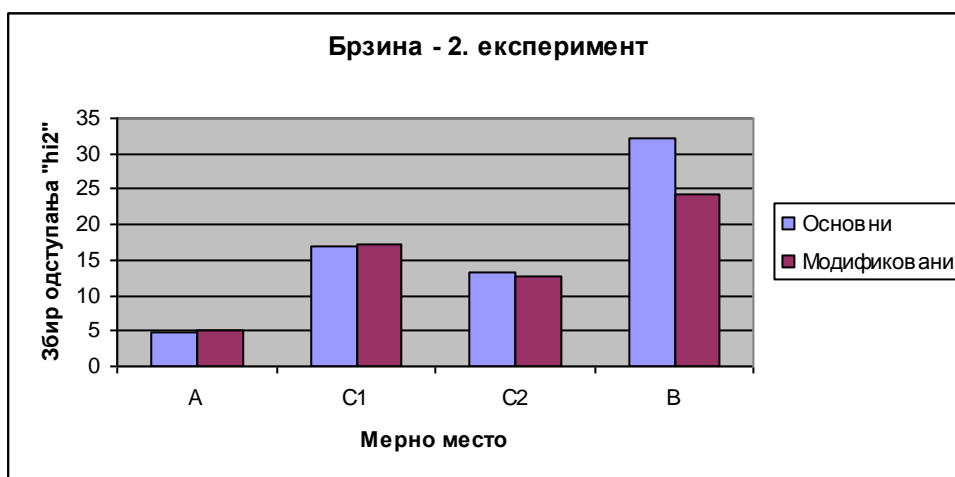




**Слика 6.17.** Поређење одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 1. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

**Табела 6.7.** Одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 1. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

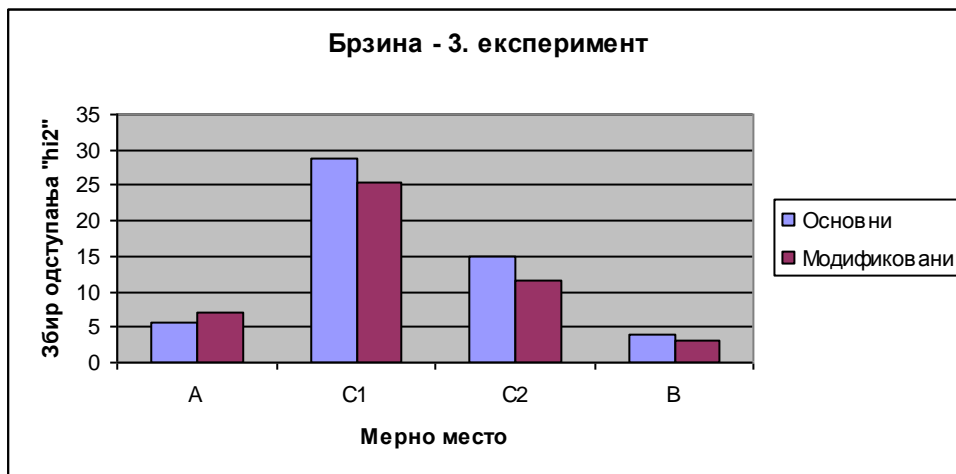
Раван	Основни	Модификовани
A	5,013047	7,394652
C1	16,71737	13,27471
C2	11,18166	10,32167
B	8,337634	6,225558



**Слика 6.18.** Поређење одступања вредности т брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 2. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

**Табела 6.8..** Одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 2. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

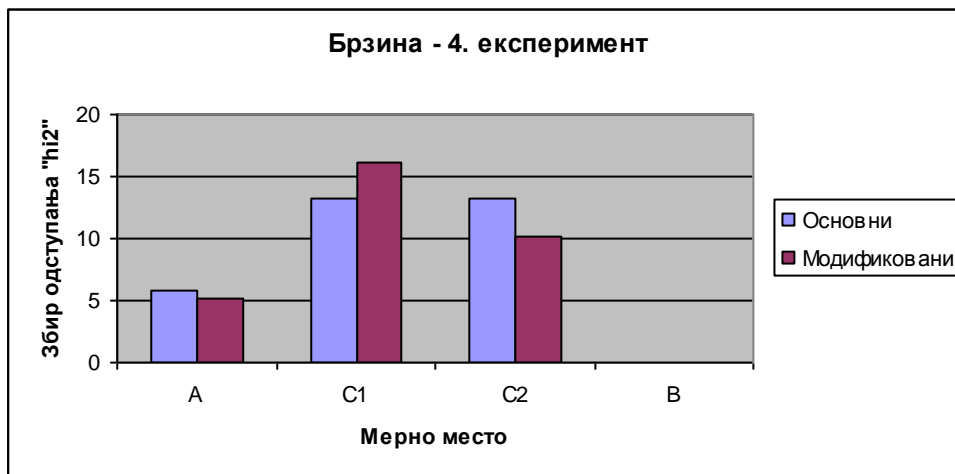
Раван	Основни	Модификовани
A	4,88576	5,043099
C1	16,91265	17,26297
C2	13,29338	12,70881
B	32,256	24,38397



**Слика 6.19.** Поређење одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 3. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “.

**Табела 6.9.** Одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 3. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

Раван	Основни	Модификовани
A	5,713439	7,043908
C1	28,69093	25,51293
C2	14,95576	11,6498
B	3,989164	3,084178

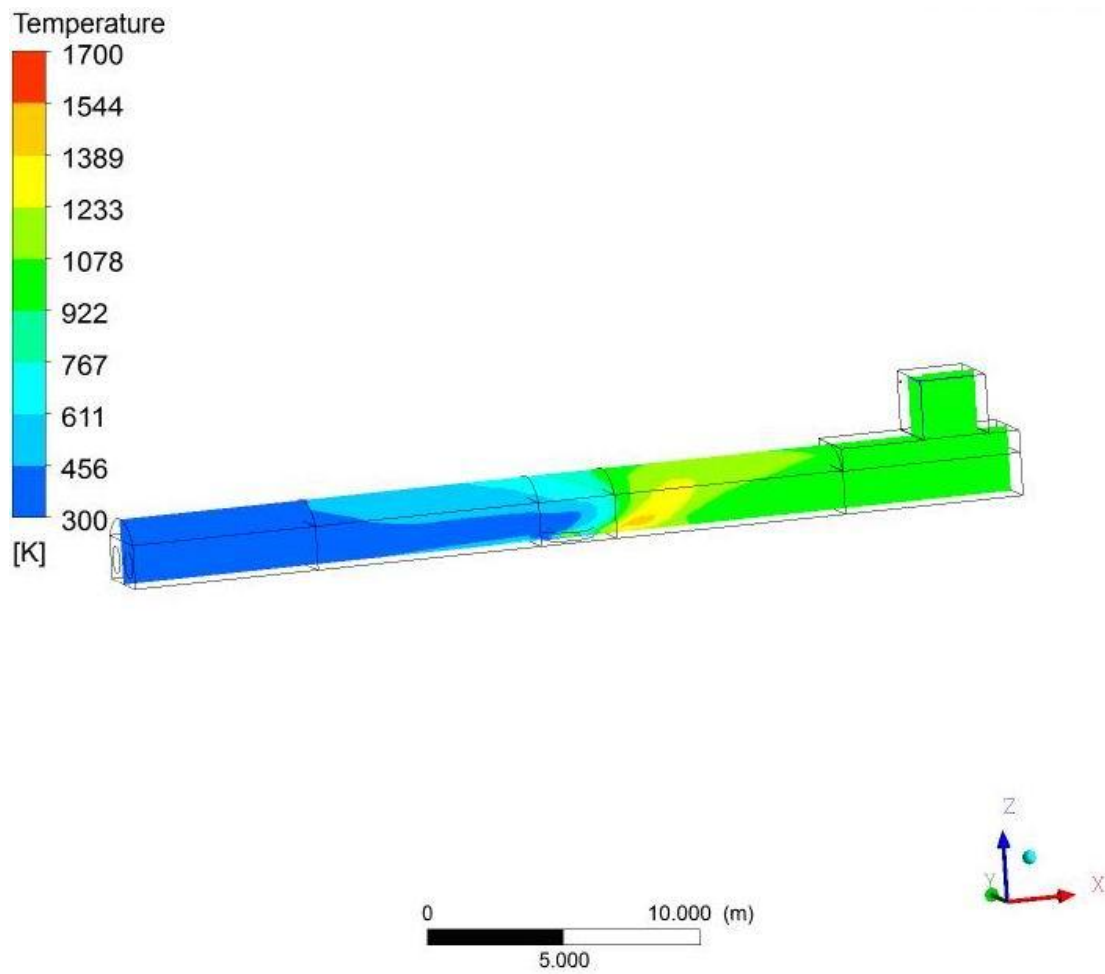


**Слика 6.20.** Поређење одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 4. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

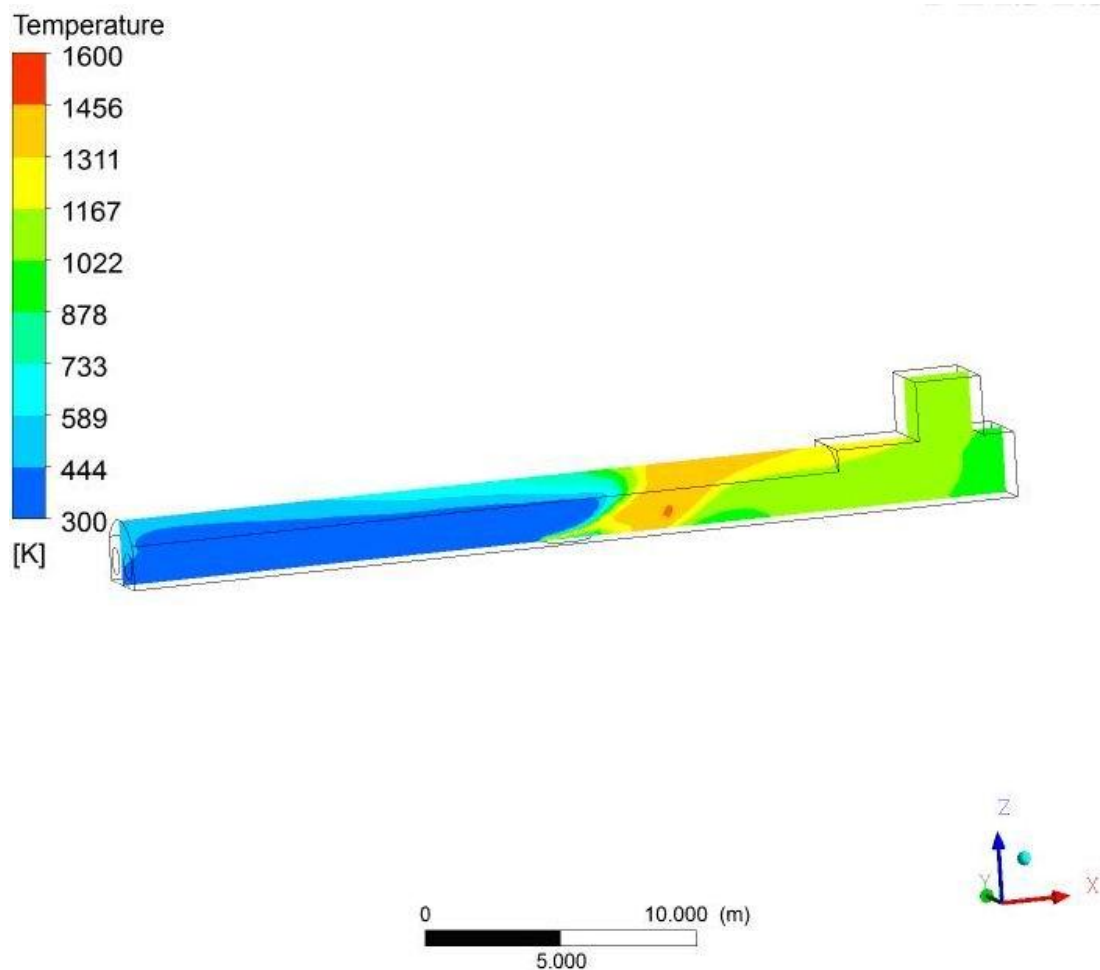
**Табела 6.10.** Одступања вредности брзина гасова добијених нумеричком симулациом основним и коригованим моделом од одговарајућих добијених у 4. експерименту, кроз приказ вредности суме „ $\chi^2$ “

Раван	Основни	Модификовани
A	5,776002	5,196403
C1	13,28763	16,1072
C2	13,26611	10,13193
B	0	0

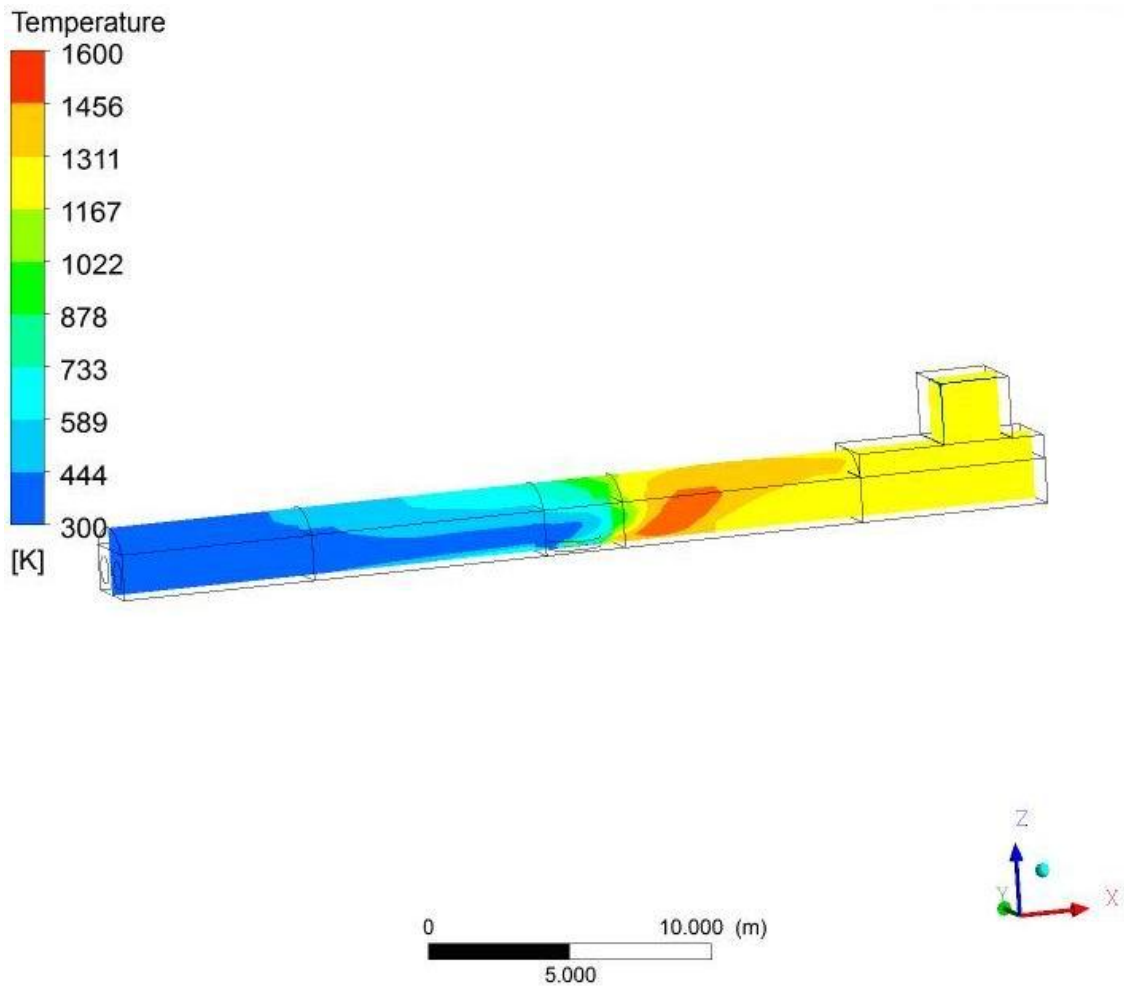
Поређења нумеричких резултата добијених са обе симулације и одговарајућих експерименталних резултата дати су у прилогу 2 и 3.



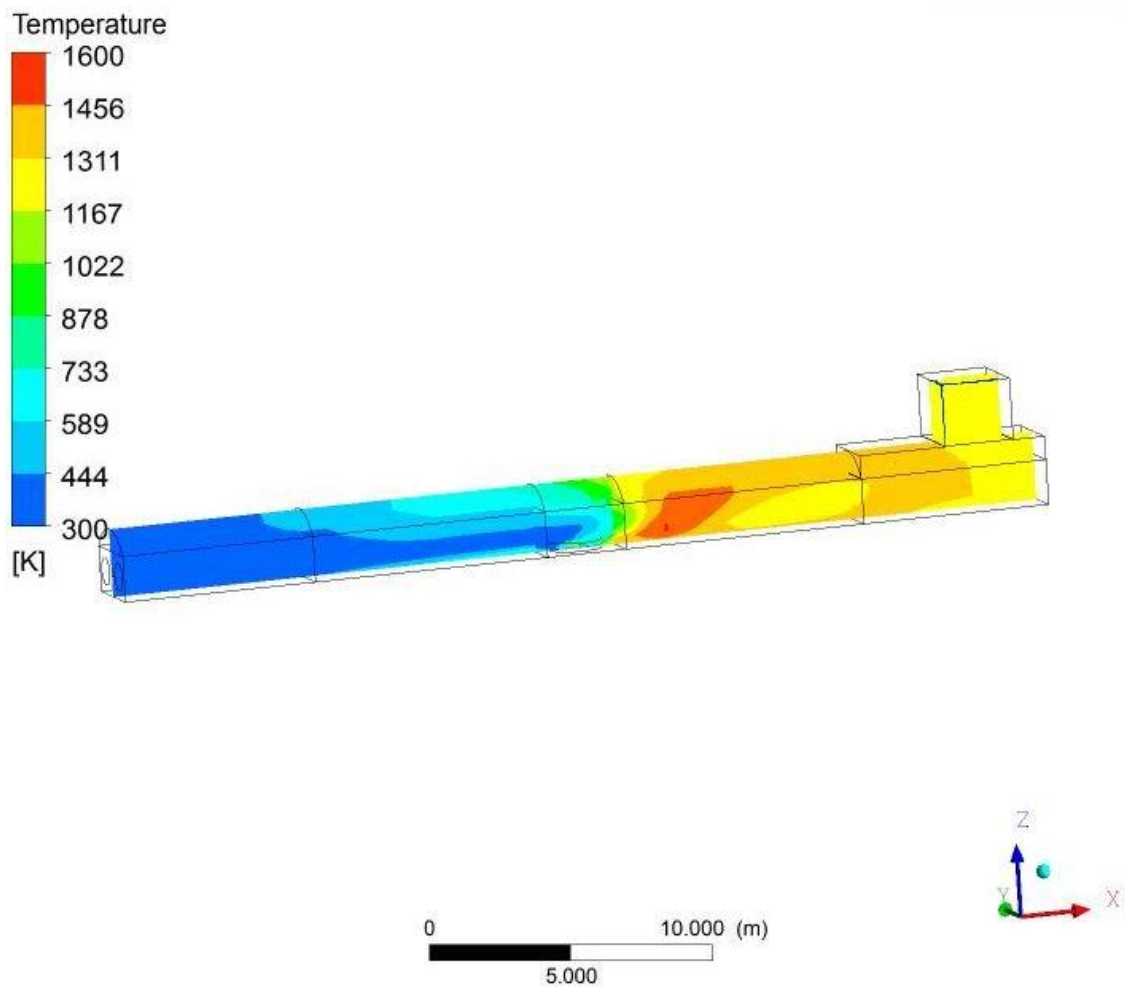
**Слика 6.21.** Приказ температурног поља у тунелу за тренутак  $t = 30s$ , добијен нумеричком симулацијом са коригованим системом ЦФГ модела



**Слика 6.22.** Приказ температурног поља у тунелу за тренутак  $t = 60s$ , добијен нумеричком симулацијом са коригованим системом ЦФГ модела

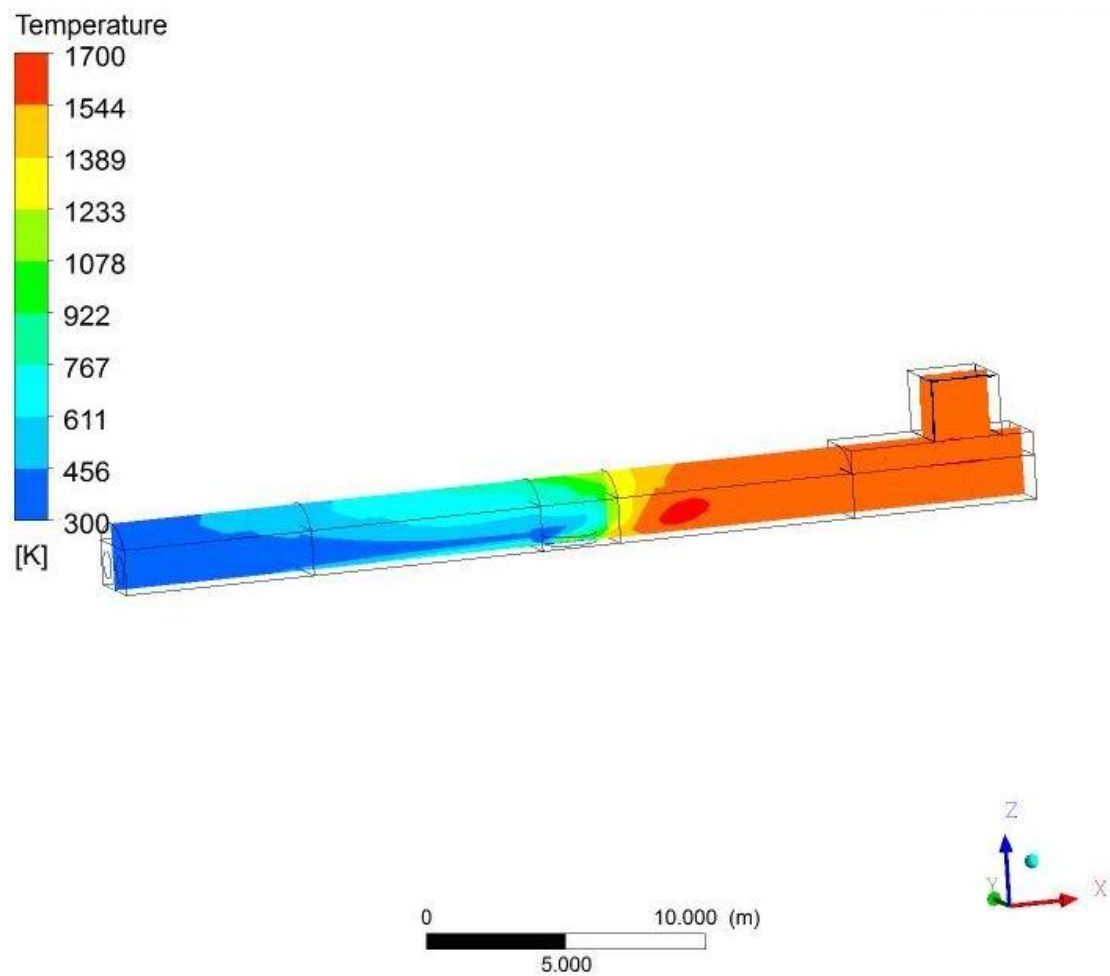


**Слика 6.23** Приказ температурног поља у тунелу за тренутак  $t = 120s$ , добијен нумеричком симулацијом са коригованим системом ЦФГ модела

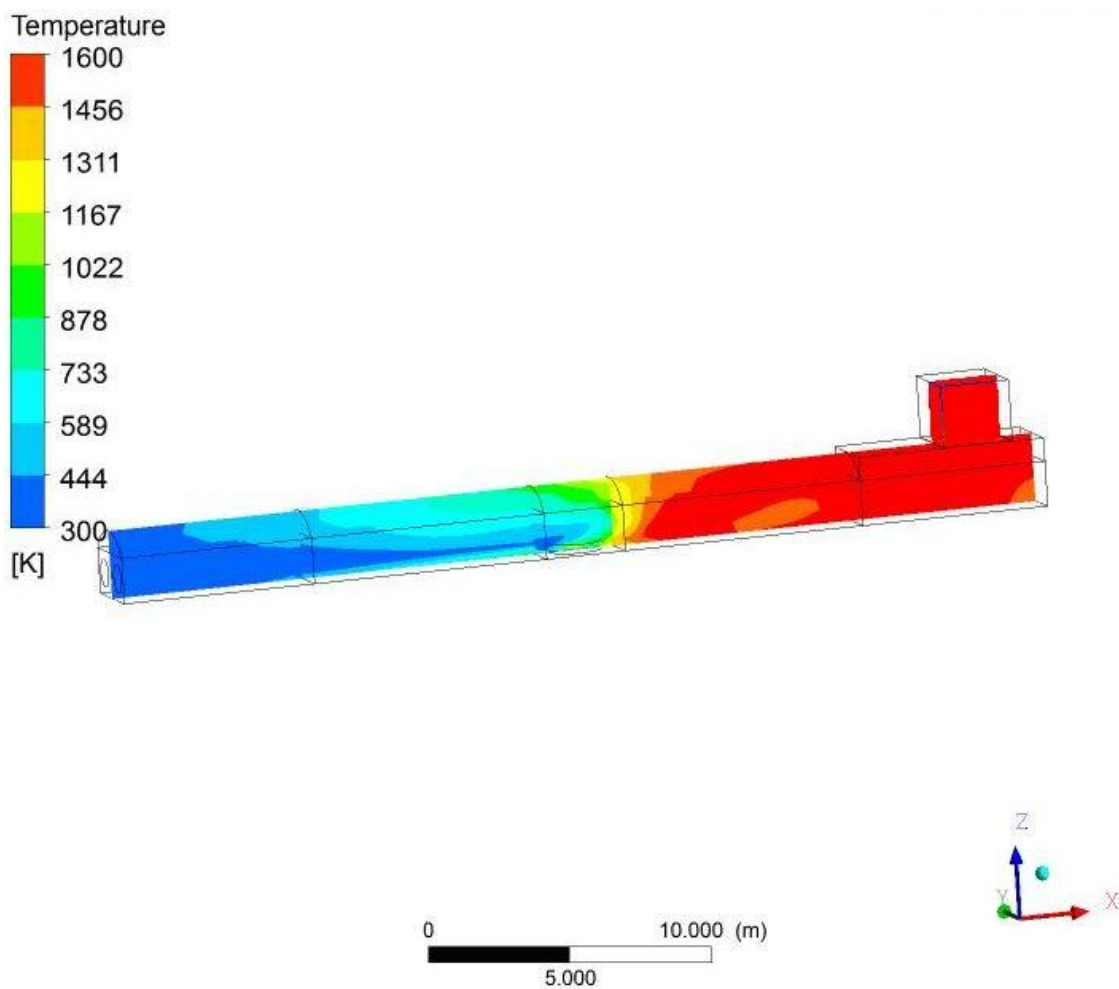


**Слика 6.24.** Приказ температурног поља у тунелу за тренутак  $t = 180s$ , добијен нумеричком симулацијом са коригованим системом ЦФГ модела





**Слика 6.25.** Приказ температурног поља у тунелу за тренутак  $t = 200s$ , добијен нумеричком симулацијом са коригованим системом ЦФГ модела



**Слика 6.26.** Приказ температурног поља у тунелу за тренутак  $t = 300s$ , добијен нумеричком симулацијом са коригованим системом ЦФГ модела

## 7. ЗАКЉУЧАК

У овој дисертацији, посвећеној проблематици математичког описивања процеса развоја пожара у тунелу коришћењем експерименталних података, приказан је поступак кориговања пакета CFD модела, у делу који се односи на дефинисање граничних услова за горуће површине. Кориговањем овог изузетно комплексног пакета CFD модела, који се састоји од „к-епсилон“ модела турбулентних напона, модела великих вртлога, модела топлотног зрачења - тзв. модел дискретних ордината и модела сагоревања - тзв. модела устаљених ламинарних пламенова, омогућено је да се тачније опишу и предвиде збивања процеса сагоревања, која се остварују при овој врсти сложеног, неизотропног и турбулентног струјања гасова у тунелу.

Процес кориговања пакета CFD модела одвијао се кроз фазе:

- детаљне анализе експерименталних резултата и установљавања зависности између сложених и спрегнутих физичких процеса сагоревања, процеса преношења топлоте и процеса струјања флуида,
- установљавању физичке суштине феномена снижавања температуре гасова у зони око и низводно од пламена, у тзв. фази прве стагнације пожара,
- анализе математичког основног пакета CFD модела којим се описује процес ширења пожара у тунелу и спровођења поступака нумеричких симулација његовом употребом;
- проналажењу разлога одступања и разјашњењу ограничења у предвиђању феномена снижавања температуре гасова у зони око и низводно од пламена, у тзв. фази прве стагнације пожара, за случај спроведених нумеричких симулација употребом основног пакета CFD модела;
- корекцији основног пакета CFD модела, која се састојала од дефинисања граничног услова за горућу површину на бази експериментално установљених вредности промене масе горива, чиме су добијена тачнија предвиђања процеса ширења пожара у тунелу, а пре свега промене температурног поља.

Оригинални научни допринос ове дисертације, може се препознати у три међусобно спрегнута резултата. Првом, који се односи на разјашњење физичке суштине процеса који доводи до пада температуре у тзв. периоду прве стагнације

пожара. Другом, уочавања недостатка основног пакета CFD модела. Треће, али и најважније, идеји извршене корекције основног пакета CFD модела, да се за гранични услов горуће површи уведе директна корелација између измерене вредности брзине промене масе горива и ослобођене количине топлоте са горуће површине.

Први, тј. разјашњење суштине физичког процеса, који доводи до пада температуре у тзв. периоду прве стагнације пожара, произашло је из детаљне анализе експерименталних резултата. Закључено је да у том периоду, у простору око пламена и низводно од њега долази да локалног недостака кисеоника и локалног снижавања притиска гасова. Истовремено са смањивањем притисака гасова, али повишењем температуре, долази до интензивног мешања гасова и повећане турбуленције. Као једна од последица ове појаве, јавља се и убрзано кретање ваздуха, које својим макроскопским кретањем почиње да све више, конвективним путем односи количину топлоте ослобођене у процесу сагоревања. Ова појава, али пре свега локални недостатак кисеоника, доводе до локалног пада температуре гасова, што представља својеврсну аномалију овакве врсте процеса сагоревања.

Други, да уочену и експериментално регистровану појаву пада температуре у периоду прве стагнације није могуће добити коришћењем нумеричним симулацијама основног пакета CFD модела, дошло се детаљном анализом једначина које треба да опишу како процесе струјања гасова, тако и процесе сагоравања и преношења топлоте. Уочено је да основни CFD модели сагоревања предвиђају, уз наравно поштовање свих билансних и стехиометриских релација, готово непосредну повезаност између процеса мешња гасова и процеса сагоревања, тј. процеса ослобађања количине топлоте у јединици времена. Повећано мешање, односно локално кретање гасова, добијено и нумеричким путем, тако ствара виртуелне услове за погрешно нумеричко предвиђање даљег континуалног раста, а не пада температуре гасова и у периоду стагнације пожара.

Повезивањем два претходна резултата дошло се и до трећег доприноса. Због сложености и комплексности коришћеног математичког-нумеричког апарата, али и табеларног приступа самом хемијском процесу сагоревања, могућност предвиђања последица које ће изазвати корекције употребљених модела била су

веома ограничена. Ипак, процедура тражења корекције која ће довести до тачнијег предвиђања, а у складу са препорукама из литературе, најпре је тражена путем одговарајућих корекција појединих коефицијената у претходно примењеним моделима. Међутим, и поред спроведених бројних нумеричких симулација, најчешће суочени са проблемом конвергенције решења, а затим и добијања резултата са још већим одступањима од експерименталних, од ове идеје се одустало и приступило потпуно другачијем концепту тражења побољшања.

Уместо тзв. табеларног приступа и посредног увођења стехиометриских једначина у прорачун, примењен је далеко једноставнији метод, заснован на пропорционалности ослобођене количине топлоте у јединици времена током процеса сагоревања и масе сагорелог горива.

Овим једноставним и непосредним приступом дефинисања овог граничног услова, избегнуто је на само улажење у сложене стехиометриске процесе сагоревања, него је избегнут и примећени недостатак основног пакета CFD модела, који грубо посматрано, процес сагоревања у нумеричкој интерпретацији своди на процес мешања гасова и горива, односно последице које тај процес мешања има на процес сагоревања.

Наставак рада на даљем усавршавању модела могао би се одвијати у више независних праваца. Тако, на пример, у циљу повећања квалитета модела било би пожељно уврстити утицај провођења топлоте кроз неадијабаске зидове, а ради провере општости модела, нумеричке симулације извршити у условима рада вентилатора, тј. принудног конвективног прелажења поплоте.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [ADR, 2011] European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, Volume II, Chapter 8.6: Road tunnel restrictions for the passage of vehicles carrying dangerous goods, from 1 January 2011, United Nations, 2010.  
<http://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr2011/11contentse.html>.
2. [AHLBORN1] Flügelrad-Anemometer Typ 9915 S1, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen.
3. [AHLBORN2] Staurohr nach Prandtl Typ FD 9912-97 T, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen.
4. [Ansys Fluent Theory Guide, 2009] ANSYS FLUENT 12.0, Theory Guide, April 2009, [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
5. [Atkinson-Wu, 1996] Atkinson, G.T., Wu, Y., *Smoke control in sloping tunnels*, Fire Safety Journ, vol. 27, 335-410, 1996.
6. [Banjac-Nikolić, 2009a] Banjac M., Nikolić B., *Computational Study of Smoke Flow Control in garage Fires and optimization of the ventilation system*, Thermal Science, Vol. 13, Issue 1, pp. 69-78 2009.
7. [Banjac-Nikolić, 2009b] Banjac M., Nikolić B., *Simulation eines Tunnelbrandes und Optimierung der Lüftungsanlage mittels numerischer Strömungsmechanik*, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., 58. Jahrgang, Heft 3/2009, pp. 148-152, 2009.
8. [Bendelius, 1996] Bendelius, A., *Memorial tunnel fire ventilation test programme*, Paper Presented in: One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, London, 1996.
9. [Benichou, 2005] Benichou, N.: *Technical Issues Involved in Developing Design Fires*, Fire Research Program, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Workshop on Design Fires, National Research Council Canada, Ottawa, Ontario, 2005.

10. [Bettis, 1993] Bettis, R.J., Jagger, S.F., Wu, Y., *Interim validation of tunnel fire consequence models*; summary of phase 2 tests, The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/93/11, The Health and Safety Executive, UK, 1993.
11. [Bettis, 1994] Bettis, R.J., Jagger, S.F., Macmillan, AJR, Hambleton, RT. *Interim validation of tunnel fire consequence models*; summary of phase 1 tests, The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/94/2, The Health and Safety Executive, UK, 1994.
12. [Beard-Carvel, 2005] Beard, A. and Richard C.: *The handbook of tunnel fire safety*, Thomas Telford Publishing, London, 2005.
13. [Boon, 2005] Boon, H. C., *Numerical Simulation of a Metro Train Fire*, Fire Engineering Research Report 05/1, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand 2005.
14. [Carvel, 2005] Carvel, R.O. Beard, A.N.; Jowitt, P.W. : *Fire Spread Between Vehicles in Tunnels: Effects of Tunnel Size, Longitudinal Ventilation and Vehicle Spacing*, Fire Technology, vol. 41, pp. 271–304, 2005.
15. [Carvel, 2004] Carvel, R.O., *FIRE SIZE IN TUNNELS*, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Heriot-Watt University School of the Built Environment Division of Civil Engineering Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS, 2004.
16. [Cox, 1989] Cox, G., Chitty, R., Kumar, S.: *Fire Safety Journ.*, 15 , pp. 103-106, 1989
17. [Danziger-Kennedy, 1982] Danziger, N.H., Kennedy, W.D., *Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels*, in: Proceedings of the Fourth International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 169–186, 1982.
18. [Digital] Endoskopkamera für Hochtemperatureinsatz, Digital-Elektronik Magdeburg GmbH, Magdeburg.
19. [EuroTAP, 2008] EuroTAP, 2008 (European Tunnel Assessment Programme), <http://www.eurotestmobility.com/eurotap.php?itemno=245&lang=EN>.
20. [FIRETUN 95] EUREKA-Project EU 499: FIRETUN *Fires in Transport Tunnels*, Report on Full- Scale Tests, Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. D-40230 Düsseldorf, 1995.

21. **[Fletscher, 1994]** Fletscher, D.F.; Kent, J.H., Apte, V.B., Green, A.R.: Fire Safety Journ., Vol. 23, pp. 305-325, 1994.
22. **[Haack, 2001]** Haack, A., FIT – *Fire in Tunnels*; Technical Report – Part 1 Design Fire Scenarios, Thematic Network FIT European Community ‘Competitive and Sustainable Growth’ Contract n° G1RT-CT-2001-05017, 2001.
23. **[Harlow-Nakayama, 1968]** Harlow, F. H., Nakayama, P. I.: *Transport of turbulence energy decay rate*, LA-3854, Los Alamos Science Laboratory, U. California, USA, 1968.
24. **[Heselden, 1976]** Heselden AJM. *Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels*. Proceedings of the Second International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Paper J1, 1976.
25. **[Ingason, 2006]** Ingason, H., *Design Fires in Tunnels, Safe & Reliable Tunnels*. Innovative European Achievements, Second International Symposium, SP Swedish National Testing and Research Institute, Lausanne 2006.
26. **[Ingason-Lönnermark, 2004]** Ingason, H., Lönnermark, A.: *Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Haet and Time-Temperature Development in Tunnels*, SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, First International Symposium, Prague, 2004.
27. **[ITIG, 2006]** International Tunnelling Insurance Group (ITIG): *Richtlinien zum Risikomanagement von Tunnelprojekten*, Zürich Global Corporate, 2006.
28. **[Kawagoe, 1963]** Kawagoe, K., Sekine., T.: Manuscript, Japan, 1963.
29. **[Kennedy-Parsons, 1996]** Kennedy, WD., Parsons, B., Critical velocity: past, present and future, Paper presented in: One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, London, 1996.
30. **[Kim, 2006]** Kim M. E.: *A Study on Pulsation in Runehamar Tunnel Fire Tests with forced longitudinal Ventilation*, Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Fire Protection Engineering, 2006.
31. **[Kohl, 2003]** Kohl, K.J., Kutz, M., Seliger, U., Starke, H., Wienecke, F., Forschungsbericht Nr. 131 AGF, *Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und*



- Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 1*, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, Mai 2003.
32. **[Koinig, 1999]** Koinig H., Referenzszenarien zur Richtlinie 96/82/EG, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Wien, Allg. beeid. und gerichtl. zert. Sachverständiger, Technisches Büro für Technische Physik, Donaust. 101/1, 2344 Maria Enzersdorf, 1999.
  33. **[Kumar-Cox, 1985]** Kumar S, Cox G. *Mathematical modelling of fires in road tunnels*. in: Proceedings of the Fifth International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, May 1985.
  34. **[Kumar-Cox, 1987]** Kumar, S., Cox, G.: *Fire Safety Science in: Proceedings of the 2nd. Intern. Sympos.*, pp. 851-860, 1987.
  35. **[Kumar-Cox, 1988]** Kumar, S., Cox, G.: *Radiant Heat And Surface Roughness Effects In The Numerical Modelling Of Tunnel Fires*, Proc. 6th Int. Symp. Aerodyn. a. Ventil. Vehic. Tunnels, Bedford, pp.515-526, 1988.
  36. **[Kumar, 1992]** Kumar, S.: *Fire Development and Smoke Spread in Tunnels- Some Modelling Considerations* in: Proc. of the 1st Intern. Confer. on Safety in Road and Rail Tunnels, Basel, 379-394, 1992.
  37. **[Lacroix, 1997]** Lacroix D., *New French recommendations for fire ventilation in road Tunnel*, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR Group Conference Series, Publication N°27, , pg. 103-123, Aosta Valley, Italy, 1997.
  38. **[Lauder–Spalding, 1974]** Launder, B. E., Spalding, D. B.: *The numerical computation of turbulent flows*, Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng., Vol.3, pp. 269-275, 1974.
  39. **[Lawson, 1996]** Lawson, J.R., *Firefighters Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1996.
  40. **[Lea, 1995]** Lea C.J., *CFD modelling of the control of smoke movement from tunnel fires using longitudinal ventilation*, The First International Symposium of IAFSS, August, ETH, Zurich, 1995.
  41. **[Lönnermark 2005]** Lönnermark, A.: *On the Characteristics of Fires in Tunnels*, Doctoral Thesis, Submitted for the degree of Doctor of Philosophy at

- the Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, 2005.
42. **[Lönnermark-Ingason, 2006]** Lönnermark, A.; Ingason, H.: *Fire Spread and Flame Length in Large-Scale Tunnel Fires*, SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, Box 857, SE-501 15, Borås, Sweden, Fire Technology, 42, 283–302, 2006.
  43. **[McCaffrey-Heskestad, 1976]** McGaffrey, B. J.; Heskestad, G.: *A Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application*, Combustion and Flame, 26, pp. 125-127, 1976.
  44. **[MED]** Heat Flux Transducers for the Direct Measurement of Heat Transfer Rates. MEDTHERM Corporation Bulletin 118, Huntsville, USA
  45. **[Muhasilovic-Deville, 2007]** [4.35.] Muhasilovic, M., Deville, M. O.: *Tunnel-Curvature's Influence on the Propagation of the Consequences of Large-Scale Accidental Fire - a CFD-Investigation*, TUBITAK, Turkish J. Eng. Env. Sci. 31, pp. 391 – 402, 2007.
  46. **[OECD, 2001]** *Safety in Tunnels, Transport of dangerous Goods Through Road Tunnels*, Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, OECD, 2001.
  47. **[Oka-Atkinson, 1995]** Oka, Y., Atkinson, G.T., “*Control of smoke flow in tunnel fires*”, Fire Safety J. 25, pp. 305–322, 1995.
  48. **[Patankar, 1980]** Patankar, S.V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1980.
  49. **[Peekel]** Messwerterfassungssystem Autolog 2100, Peekel Instruments GmbH, Bochum.
  50. **[Pettersson, 1977]** Pettersson, O., Magnusson, S.E., Thro, J.: *Brandschutztechnische Bemessung von Stahl konstruktionen*, Berlin, 1977.
  51. **[Piarç, 1999]** Piarç, Committee On Road Tunnels (C5), *Fire And Smoke Control In Road Tunnels* 05.05.B, 1999.
  52. **[Pleß-Seliger, 2009]** Pleß, G., P., Seliger, U., *Untersuchung der bedingungen für die feuerwehren bei Der bekämpfung von bränden in verkehrstunneln unter Berücksichtigung der in den risikoanalysen der OECD-PIARC zugrundeliegenden brandszenarien für Verschiedene unfälle*, Teil 1

- Forschungsbericht nr. 158, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2009 (Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung).
53. [**Promat, 2008**] Promat: *Tunnel Fire Protection, A conversion from NFPA 502 standard to practical systems and tested solutions*, Promat International NV, Bormstraat 24, Tisselt, BE – 2830 BELGIUM, <http://www.promat-tunnel.com>, info@promattunnel.Com, 2008.
  54. [**RABT 2006**] *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Bundesministerium für Arbeitsgruppe Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2006.
  55. [**Reknagel-Sprenger, 1987**] Reknagel, Sprenger, Henman, Građevinska knjiga Beograd, 3.dopunjeno srpsko izdanje, 1987.
  56. [**Ris-Cheng, 1994**].de Ris, J., Cheng, X-F. “*The role of smoke point in material flammability testing*” Proc. 4th Int. Symp. on Fire Safety Science, pp. 301-312. IAFSS, Boston 1994.
  57. [**Simcox, 1988a**] Simcox, S., Wilkes, N.S., Jones, I.P.: Report No. AERE-G 4677, Harwell Laboratory, Harwell, 1988.
  58. [**Simcox, 1988b**] Simcox, S., Wilkes, N. S., Jones, I.P.: Report No. AERE-G 4782, Harwell Laboratory, Harwell, 1988.
  59. [**Simcox, 1992**] Simcox, S., Wilkes, N.S., Jones, I.P.: Fire Safety Journ.,18, pp. 49-73, 1992.
  60. [**Sivathanu–Faeth, 1990,**] Sivathanu, Y. R., Faeth, G. M.. Generalized State Relationships for Scalar Properties in Non-Premixed Hydrocarbon/Air Flames. Combustion and Flame, 82:211–230, 1990.
  61. [**Spalding, 1999**] Spalding, B.: Phoenics Encyclopaedia, CHAM, London, UK, 1999.
  62. [**Speziale, 1998**] Speziale, C. G. and R. M. C. So: *Turbulence Modeling and Simulation*, Part of The Handbook of Fluid Dynamics, Edited by Johnson R. W., Part 14,1988.
  63. [**Thies**] Wetterstation, Adorf Thies GmbH & Co KG, Göttingen

64. [Thomas, 1968] Thomas, P.H., “*The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against an Air Flow*”, Fire Research Note, No. 723, Fire Research Station, Watford, UK, 1968.
65. [Thornton, 1917] Thornton, W.M.: *The relation of oxygen to the head of combustion of organic Compounds*, the London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science 33, London, 1917.
66. [Tuovinen, 1996] Tuovinen, H., Holmstedt, G., Bengtson, S.: *FireTechn.*, 2nd. Quarter, pp. 98-119, 1996.
67. [VDI 1977] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmübergang, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Verlag GmbH, ISBN 3-18-400373-6, 1977.
68. [Vela, 2009] Vela, I.: *CFD prediction of thermal radiation of large, sooty, hydrocarbon pool fires*, Thesis submitted to the Department of Chemistry of Universität Duisburg-Essen, 2009.
69. [Versteeg, 1995] Versteeg, H. K., W. Malalasekara: *An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method*, Pearson Education Limited, Harlow, England, 1995.
70. [Vidaković, 1998.] Vidaković, M., *Termodinamika nekontrolisanog sagorevanja*, Prometej, Novi Sad, 1988.
71. [Vidaković-Vidaković, 2008]. Vidaković, M., Vidaković, B.: *Požar i arhitektonski inženjering*, Priručnik, Fahrenheit, Beograd, 2008.
72. [Vidaković, 1983] Vidaković, M.: *Zaštita od požara kod sistema za ventilaciju i klimatizaciju, doktorski rad*, Fakultet ZNR, Niš, 1983.
73. [Waninger–Harth, 2004] Waninger, K. J.; Harth, C.: *Aktuelle Brandschutzkonzepte für enge Räume mit erhöhtem Brandgefahren am Beispiel von Tunnelbauwerken*, Fachhochschule Mainz, University of Applied Sciences, Institut für Baubetrieb e.V., Mainz, Juli, 2004.
74. [Wietfeldt, 2002] Wietfeldt, P.: *Zur Bedeutung der Begriffe "Gefahr", "Risiko" und "Vorsorge" im Störfallrecht*, Technische Überwachung : Anlagensicherheit - Arbeits- und Gesundheitsschutz - Umweltschutz. - 43, H. 4 , S. 39-46, 2002.
75. [Wilcox, 1988] Wilcox, C.: *Reassessment of the scale determining equation for advanced turbulence models*, AIAA Journal, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1334, 1988.

76. [**Woodburn-Britter, 1996a**] Woodburn, P.J., Britter, R.E.: Fire Safety Journ. Vol. 26, pp. 35-62, 1996.
77. [**Woodburn-Britter, 1996b**] Woodburn, P.J.; Britter, R.E.: Fire Safety Journ. Vol. 26, pp. 62-390, 1996.
78. [**Wu-Bakar,2000**] Wu. Y., Bakar, M.Z.A., “*Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems- a study of the critical velocity*”, Fire Safety J. 35, pp. 363–390, 2000.
79. [**Woodburn-Britter, 1996a**] Woodburn, PJ, Britter RE., *CFD simulation of a tunnel fire*, Part 1. Fire Safety Jour., Vol. 26, 35-62, 1996.
80. [**Woodburn-Britter, 1996b**] Woodburn, PJ, Britter RE., *CFD simulation of a tunnel fire*, Part 2. Fire Safety Journ., Vol. 26, pp. 62-390, 1996.
81. [**Xue, 1993**] Xue, H., Hihara, E., Saito, T.: Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 36, No. 7, pp. 1739-1748, 1993.
82. [**Xue, 1994**] Xue, H., Hihara, E., Saito, T.: JSME Intn. J., Ser. B, Vol. 37No. 1, pp.187-194, 1994.
83. [**Xue, 1995**] Xue, H., Chew, T.C., Cheong, H.F.: Comb.Sci. and Techn., Vol. 105, pp.117-129, 1995.
84. [**Xue, 2001**] Xue, H., Ho, J.C., Cheng, Y.M.: Fire Safety Journ. Vol. 36, pp. 37-54, 2001.

## **ПРИЛОГ 1.**

### **9. ОДРЕЂВАЊЕ ОДСТУПАЊА РЕЗУЛТАТА ДОБИЈЕНИХ НУМЕРИЧКИМ СИМУЛАЦИЈАМА ОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА - ПЕАРСОНОВ $\chi^2$ ТЕСТ.**

У циљу установљавања поузданости предвиђања математичког модела, односно мере одступања резултата добијених нумеричким симулацијама од одговарајућих експерименталних података, као и праћења последица кориговања математичких модела, употребљен је један од најчешће коришћених непараметарских тестова, тзв. Пеарсонов  $\chi^2$  тест. Чињеница да се овај тест по правилу користи како би се установило да ли постоји статистички значајна повезаност обележја два независна узорка, и то за случај нумеричких малих узорака, учинило је овај тест оптималним за ову сврху.

Основна замисао је била да се тестирање хипотезе да ли постоји повезаности резултата добијених нумеричким симулацијама од одговарајућих експерименталних података изврши поређењем табличне вредности  $\chi^2_\alpha$  за предпостављени услов прага значајности  $\alpha = 0,05$  и израчунате вредности  $\chi^2$ , односно да овај праг значајности буде гранични услов, чијим се испуњавањем сматра да математички модел даје прихватљиво тачне резултате, тј. да даље кориговање модела више није неопходно. Међутим, показало се да за поједине серије експерименталних података, због њиховог великог расипања, односно и њихове изражене непоузданости, није било могуће ни под којим условима и примењеним моделима остварити тражени захтевани ниво повезаности. Због тога је одлучено да критеријум Пеарсонов-ог  $\chi^2$  теста послужи пре свега као смерница, која показује да одговарајући математички модел даје резултате приближније одговарајућим експерименталним, уколико добијени резултати обезбеђују смањивање вредности  $\chi^2$ .

У конкретном случају, будући да је тестирање вршено за узорке који су се састојали од 2 групе података ( $k = 2$ ) и то за 10 вредности величина стања ( $n = 10$  временских тренутка), тзв. број степени слободe износио је:

$$S.S. = (n - 1)(k - 1) = 9,$$

па је таблична вредност  $\chi^2_\alpha$ , за предпостављени услов прага значајности  $\alpha = 0,05$  износила  $\chi^2_\alpha = 16,919$ .

Са друге стране, вредности  $\chi^2$  рачунате за свако мерно место одређиване су као:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{\text{exp},i} - y_{\text{num},i})^2}{y_{\text{num},i}}$$

где је са  $y_{\text{exp},i}$  означена измерена вредност одговарајуће величине стања (брзине или температуре ваздуха), а са  $y_{\text{num},i}$  означена вредност величине стања добијена нумеричком симулацијом.

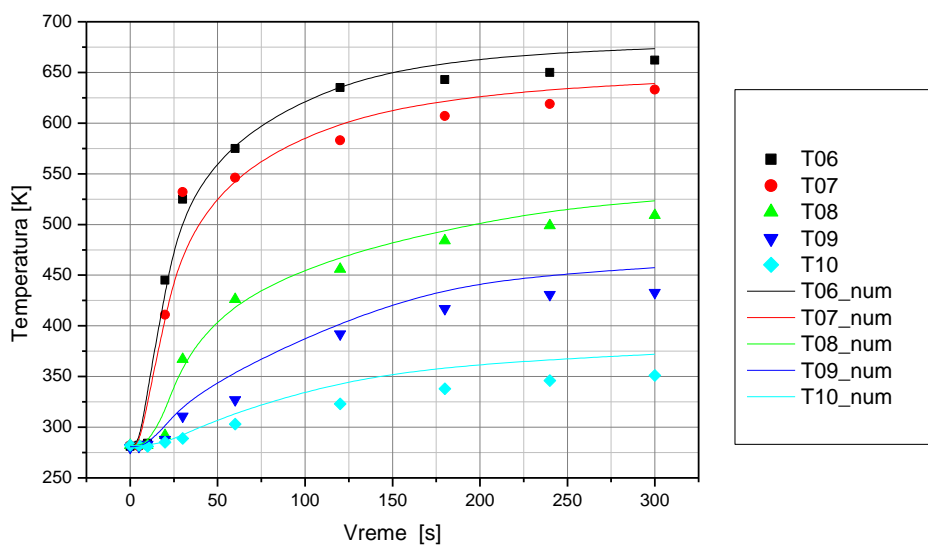
Изречунате вредности  $\chi^2$  са сваку серију података приказани су у последњем реду одоварајуће табеле.

## ПРИЛОГ 2:

### **10. Поређење температура и брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем основног модела**

#### **10.1. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем основног модела**

##### **Експеримент 1. (БВ07)**

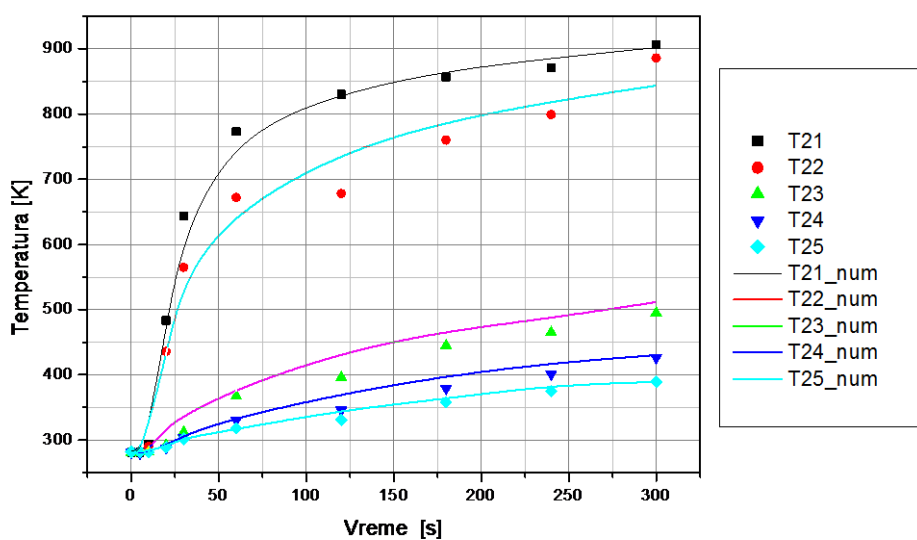


**Слика 10.1.1** Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у осни тунела на мерном месту А



**Табела 10.1.1.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А (*АII*) за пожарни тест БВ07 (слика 5.10.)

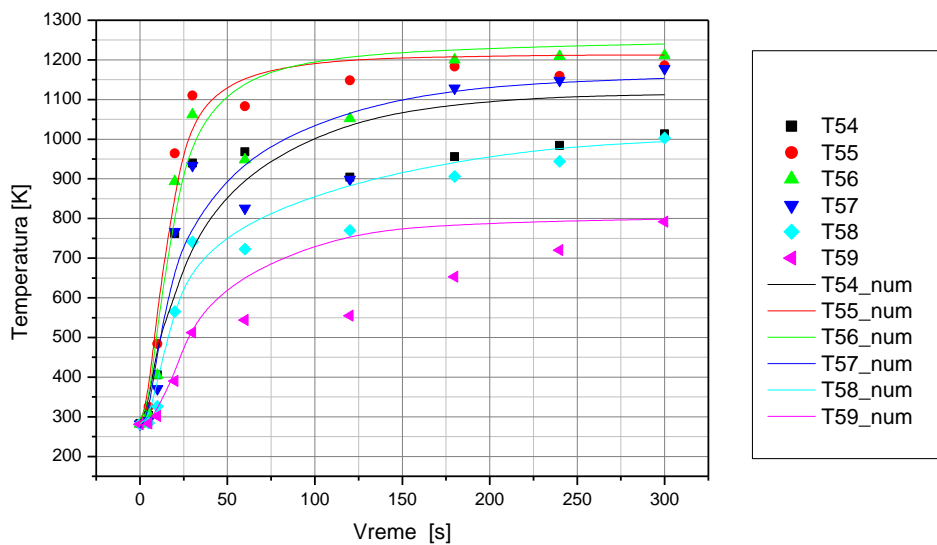
Температуре у К на мерниом месту <i>АII</i>					
Време у s	T06	T07	T08	T09	T10
0	281	282	282	280	282
5	282	281	282	281	282
10	284	282	282	283	281
20	445	411	292	288	285
30	525	532	367	311	289
60	575	546	426	327	303
120	635	583	456	392	323
180	643	607	484	417	338
240	650	619	499	431	346
300	662	633	509	433	351



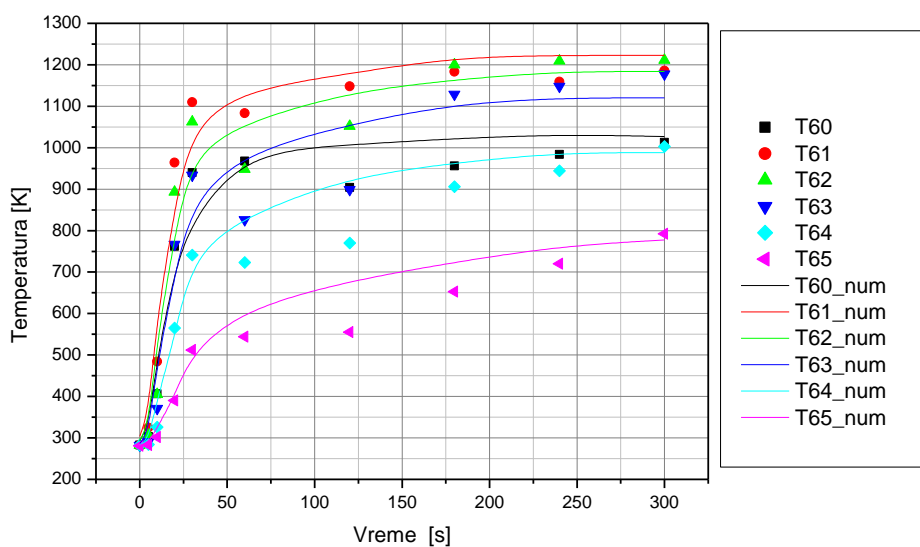
Слика 10.1.2. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

Табела 10.1.2. Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б ( $BV$ ) за пожарни тест БВ07 (слика 5.10.)

Температуре у К на мерниом месту $BV$					
Време у s	T21	T22	T23	T24	T25
0	281	282	281	281	282
5	281	282	282	280	282
10	294	290	282	282	281
20	483	436	292	288	289
30	643	565	312	304	302
60	773	672	367	330	318
120	830	678	396	346	331
180	857	760	445	379	358
240	871	799	465	401	375
300	906	886	495	426	389



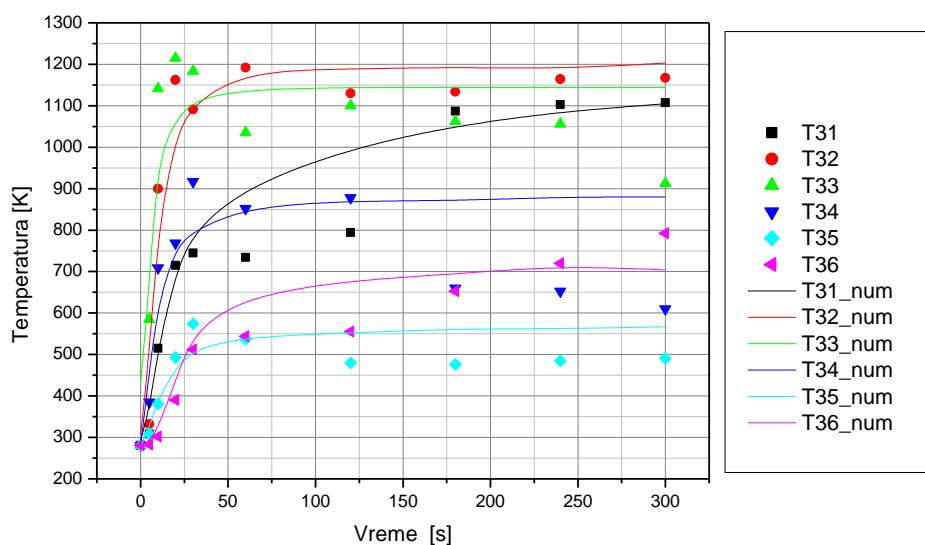
Слика 10.1.3. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



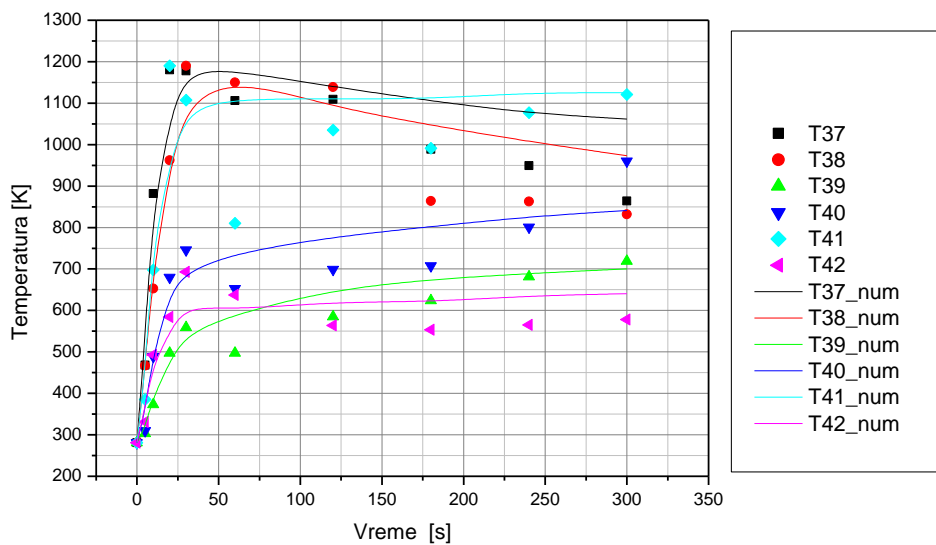
Слика 10.1.4. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д

**Табела 10.1.3.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д за пожарни тест БВ07 (слика 5.8.)

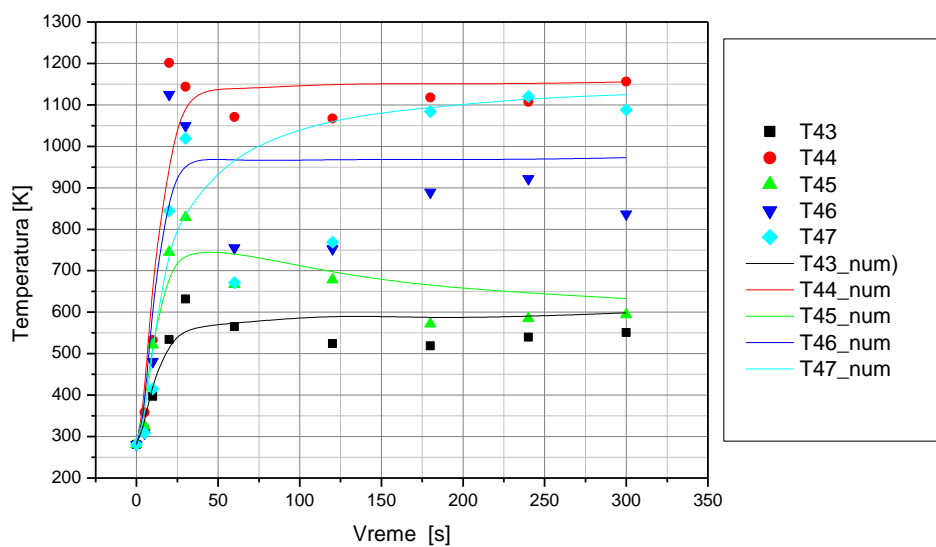
Температуре у К на мерниом месту Д												
Време у s	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	283	282	282	282	282	281	281	281	281	281	283	281
5	303	325	307	291	284	283	283	283	284	283	304	283
10	406	484	405	371	326	302	295	295	297	294	392	292
20	762	964	893	767	565	390	371	376	384	364	659	353
30	940	1110	1062	934	741	512	469	449	457	425	810	404
60	968	1083	948	826	723	544	480	507	484	439	870	411
120	904	1148	1052	899	770	555	509	523	504	442	938	407
180	956	1183	1200	1129	906	653	609	596	607	532	988	473
240	984	1159	1209	1148	944	720	636	615	629	551	1005	493
300	1013	1186	1211	1178	1003	792	667	633	630	578	1035	516



**Слика 10.1.5.** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



Слика 10.1.6. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



Слика 10.1.7. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц

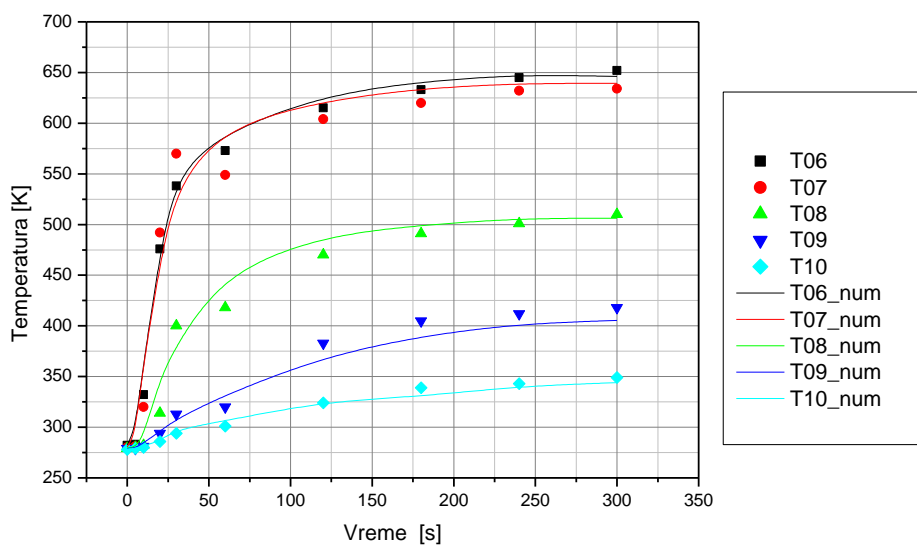
**Табела 10.1.4.** Промена температуре ваздуха мерној равни Ц за пожарни тест БВ07 (слика 5.9.)

Температуре у К на мерној равни Ц									
Време у s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	281	281	281	281	281	281	281	281	281
5	308	332	585	385	308	331	468	467	303
10	515	900	1141	709	381	462	882	653	373
20	715	1162	1215	769	493	667	1180	962	497
30	745	1091	1183	917	574	682	1178	1190	559
60	734	1192	1035	852	537	567	1106	1150	497
120	794	1130	1100	878	480	531	1109	1139	585
180	1087	1134	1062	660	476	617	989	864	624
240	1103	1164	1056	653	485	626	949	863	681
300	1107	1167	913	610	491	636	864	832	719

Температуре у К на мерној равни Ц								
Време у s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47
0	281	281	281	281	281	281	281	281
5	310	385	331	316	358	325	308	309
10	489	698	493	397	533	521	481	415
20	680	1190	584	534	1201	745	1125	844
30	746	1107	693	632	1144	829	1050	1019
60	653	810	637	565	1071	667	755	671
120	699	1035	564	524	1067	678	753	769
180	708	991	553	519	1118	572	889	1084
240	801	1077	565	540	1107	585	922	1120
300	960	1121	578	551	1156	594	837	1088

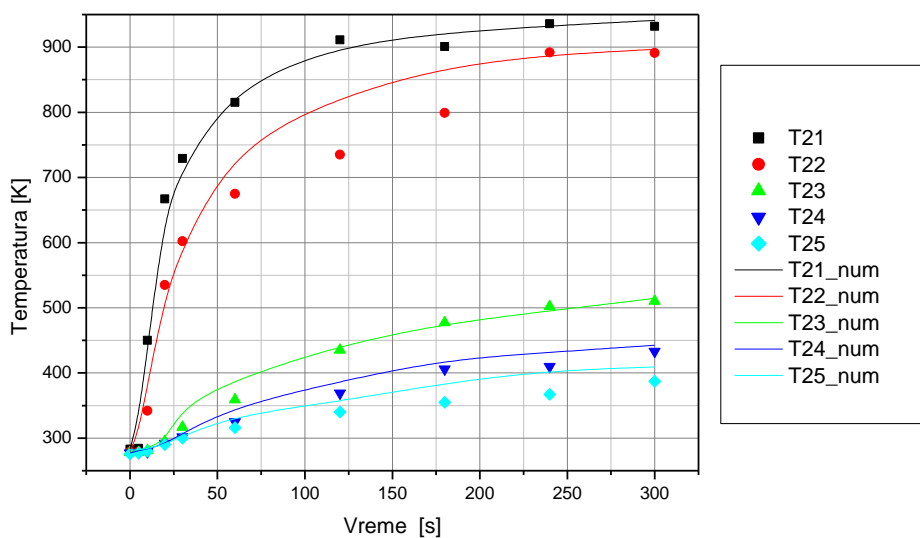
## Експеримент 2. (БВ08)



Слика 10.1.8. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А

Табела 10.1.5. Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А (AII) за пожарни тест БВ08 (слика 5.10.)

Температуре у К на мерниом месту AII					
Време у s	T06	T07	T08	T09	T10
0	282	280	279	279	278
5	283	281	280	279	279
10	332	320	282	281	280
20	476	492	314	294	286
30	538	570	400	313	294
60	573	549	418	320	301
120	615	604	470	383	324
180	633	620	491	405	339
240	645	632	501	412	343
300	652	634	510	418	349

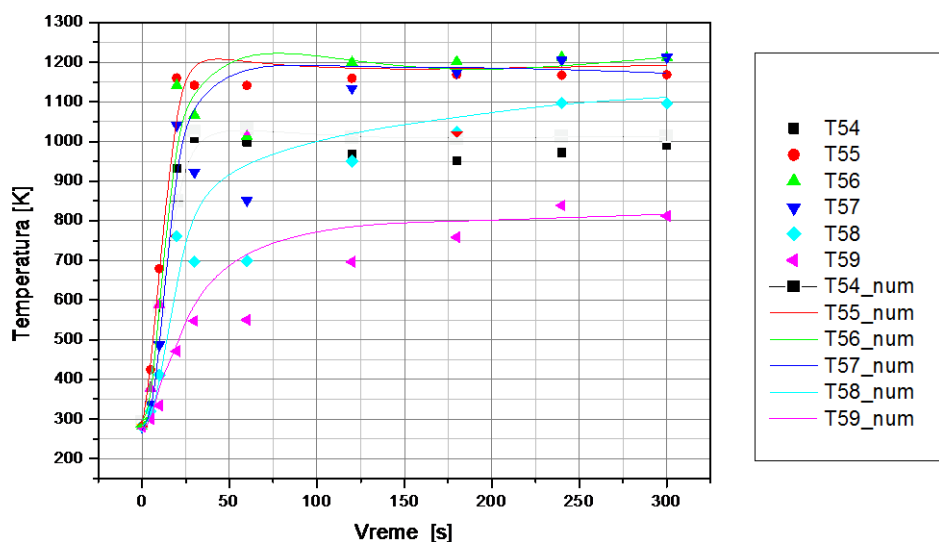


**Слика 10.1.9** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

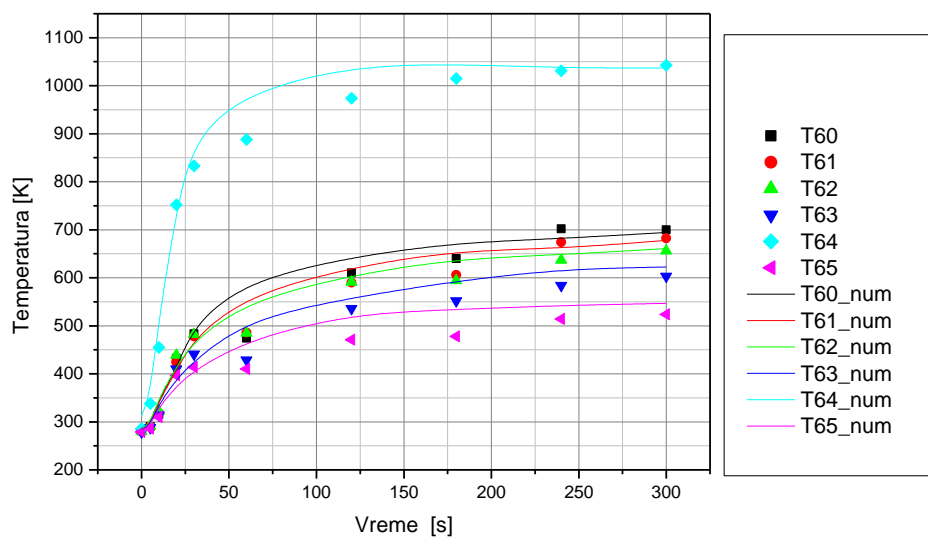
**Табела 10.1.6.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б (*BV*) за пожарни тест БВ08 (слика 5.10.)

Температуре у К на мерниом месту <i>BV</i>					
Време у s	T21	T22	T23	T24	T25
0	283	279	278	277	276
5	284	279	278	278	277
10	450	342	281	279	280
20	667	535	295	292	290
30	729	602	317	302	300
60	815	675	359	325	316
120	911	735	435	369	340
180	901	799	477	406	355
240	936	892	502	410	367
300	932	891	510	433	387





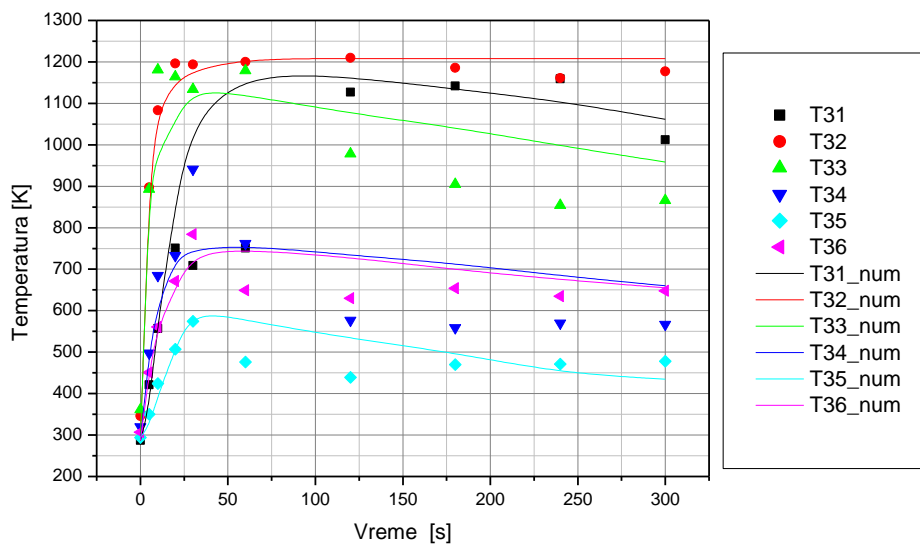
Слика 10.1.10. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



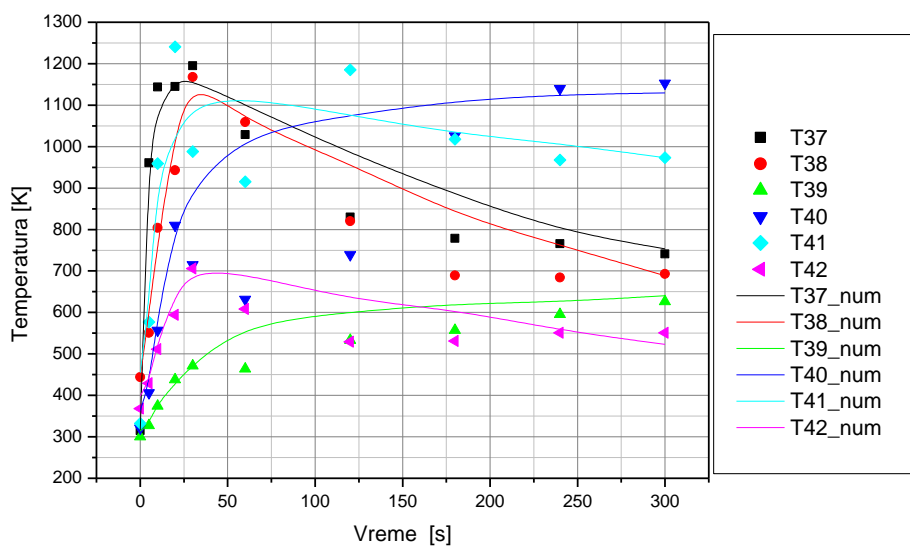
Слика 10.1.11 Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д

**Табела 10.1.7.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д за пожарни тест БВ08 (слика 5.8.)

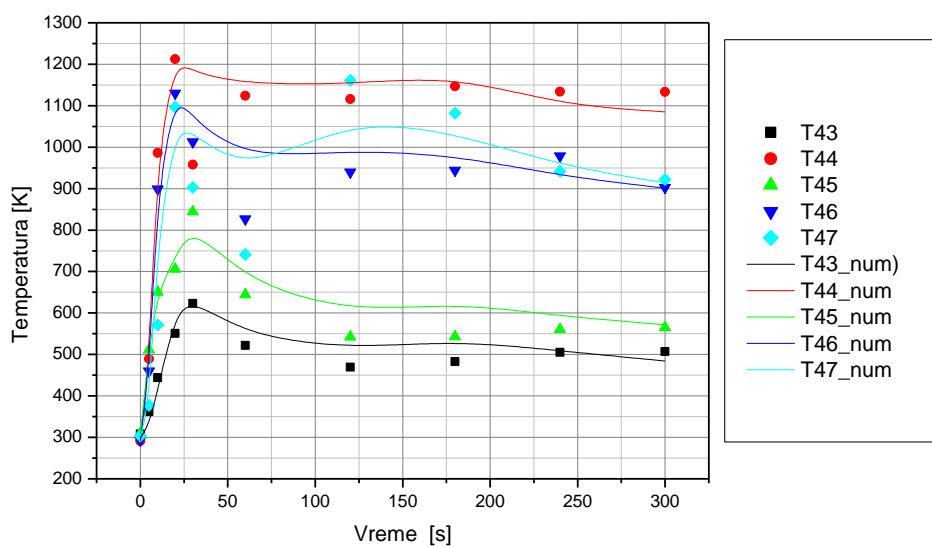
Температуре у К на мерниом месту Д												
Време у s	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	285	282	281	280	280	280	281	280	280	279	286	279
5	384	424	377	337	320	300	290	290	291	288	338	286
10	581	679	589	487	411	334	316	317	322	314	455	310
20	932	1160	1141	1041	761	471	432	424	439	410	752	397
30	1006	1142	1066	922	697	547	483	478	482	441	833	414
60	998	1141	1013	851	698	550	474	486	485	429	888	410
120	967	1159	1199	1134	950	696	610	590	591	536	974	471
180	951	1169	1201	1175	1024	758	640	606	594	552	1015	478
240	972	1167	1212	1205	1097	838	702	674	637	584	1031	514
300	990	1168	1212	1212	1096	812	700	682	656	603	1043	524



**Слика 10.1.12** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



Слика 10.1.13 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



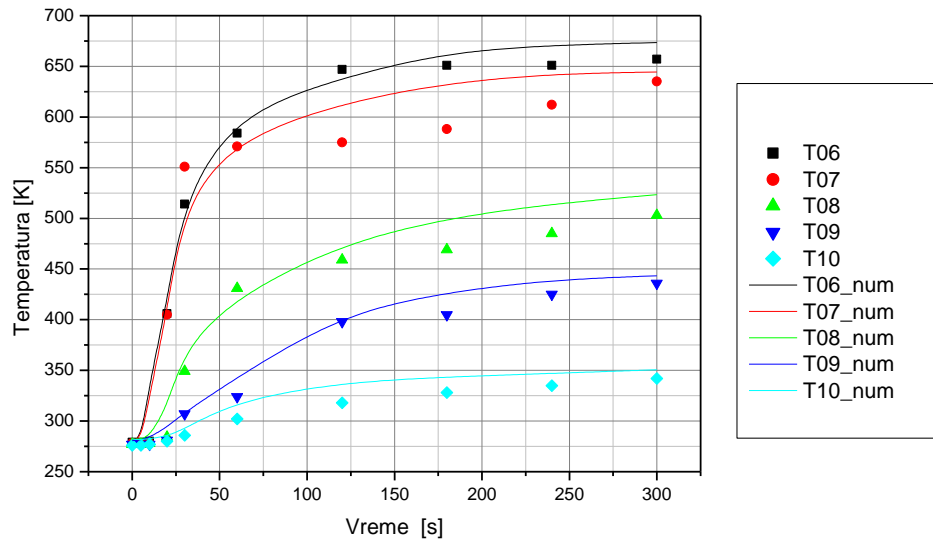
Слика 10.1.14 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц

**Табела 10.1.8.** Промена температуре ваздуха мерној равни Ц за пожарни тест БВ08 (слика 5.9.)

Температуре у К на мерној равни Ц									
Време у s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	287	346	361	320	294	307	315	444	300
5	421	897	893	498	350	451	961	551	327
10	557	1083	1181	685	424	561	1144	804	374
20	751	1196	1164	733	507	671	1145	943	438
30	709	1194	1134	941	574	784	1195	1168	471
60	751	1200	1179	762	476	649	1029	1059	464
120	1127	1210	978	577	439	630	830	820	533
180	1142	1186	905	559	470	654	779	689	557
240	1159	1161	854	570	471	635	766	684	595
300	1012	1177	866	567	478	648	741	693	626

Температуре у К на мерној равни Ц								
Време у s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47
0	321	332	368	308	291	310	293	303
5	406	577	429	362	489	511	460	377
10	557	959	511	444	986	650	899	571
20	810	1241	594	551	1212	706	1130	1097
30	715	988	706	623	958	844	1013	903
60	632	915	608	522	1124	644	827	741
120	739	1185	529	469	1116	542	940	1161
180	1026	1018	531	483	1147	543	944	1082
240	1140	968	551	505	1134	560	979	942
300	1153	973	551	507	1133	565	903	922

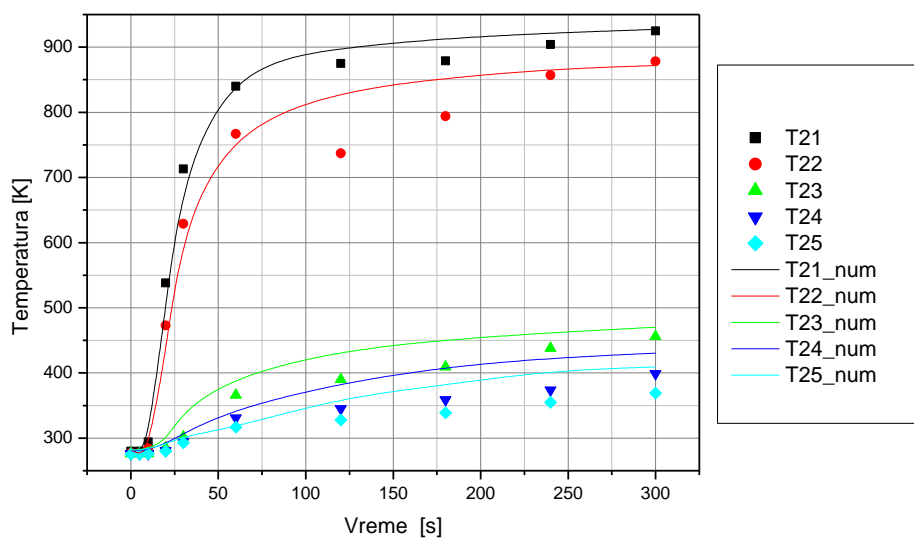
### Експеримент 3. (БВ09)



Слика 10.1.15. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А

Табела 10.1.9. Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А (AII) за пожарни тест БВ09 (слика 5.10.)

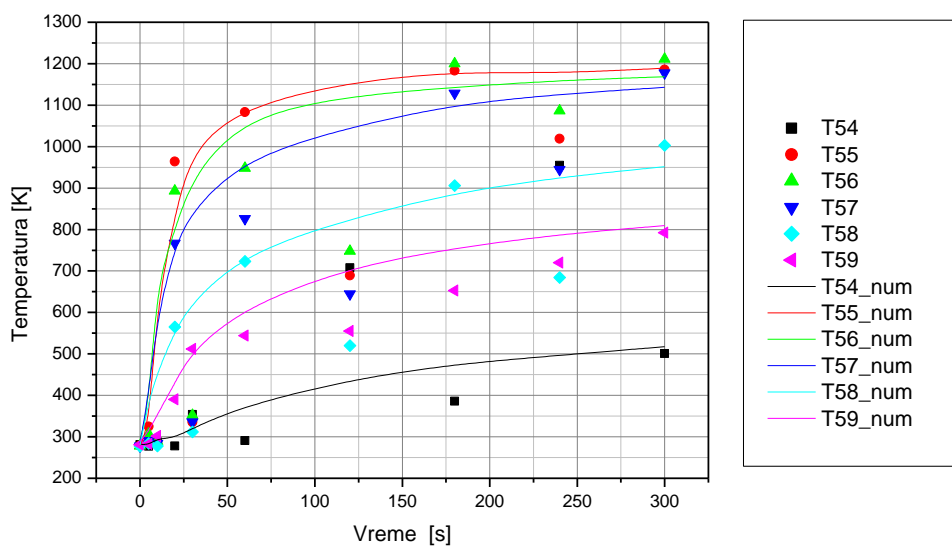
Температуре у К на мерниом месту AII					
Време у s	T06	T07	T08	T09	T10
0	279	278	277	277	276
5	279	278	277	277	276
10	280	278	278	277	277
20	406	405	284	281	280
30	514	551	349	307	286
60	584	571	431	324	302
120	647	575	459	398	318
180	651	588	469	405	328
240	651	612	485	425	335
300	657	635	503	436	342



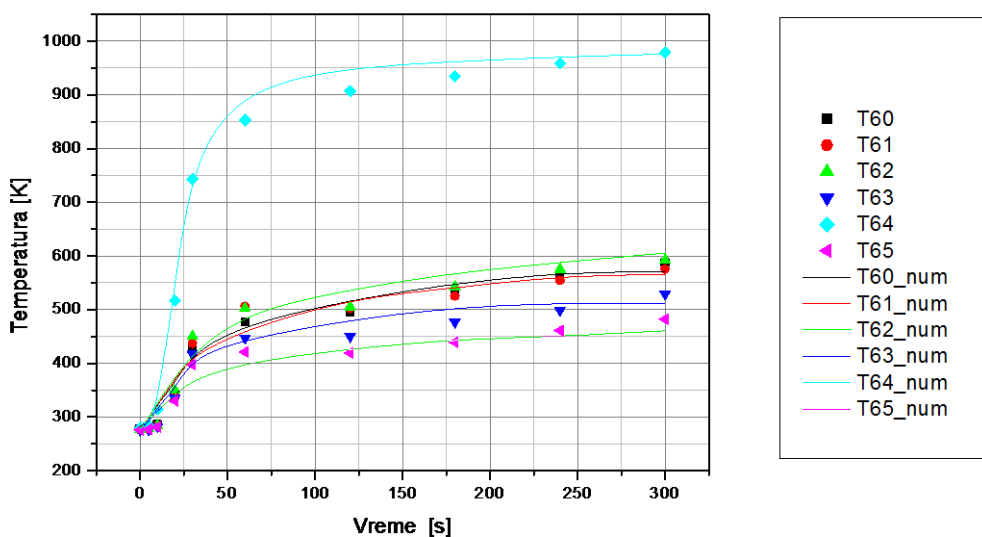
**Слика 10.1.16** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

**Табела 10.1.10.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б (*BV*) за пожарни тест БВ09 (слика 5.10.)

Температуре у К на мерниом месту <i>BV</i>					
Време у s	T21	T22	T23	T24	T25
0	280	277	276	276	275
5	280	277	276	276	275
10	294	284	276	276	276
20	538	473	285	281	280
30	713	629	302	295	293
60	840	767	366	331	317
120	875	737	390	345	328
180	879	794	409	359	339
240	904	857	438	374	355
300	925	878	456	399	369



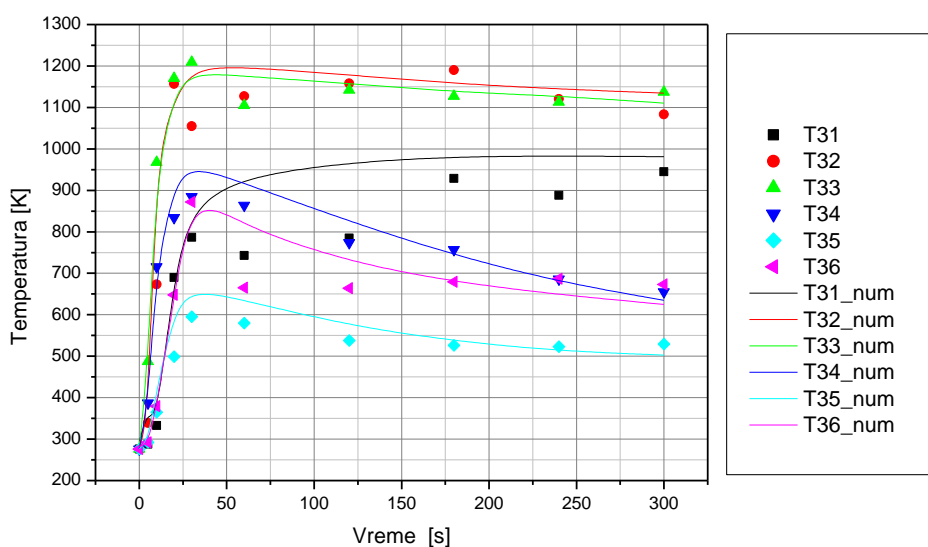
Слика 10.1.17 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



Слика 10.1.18 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д

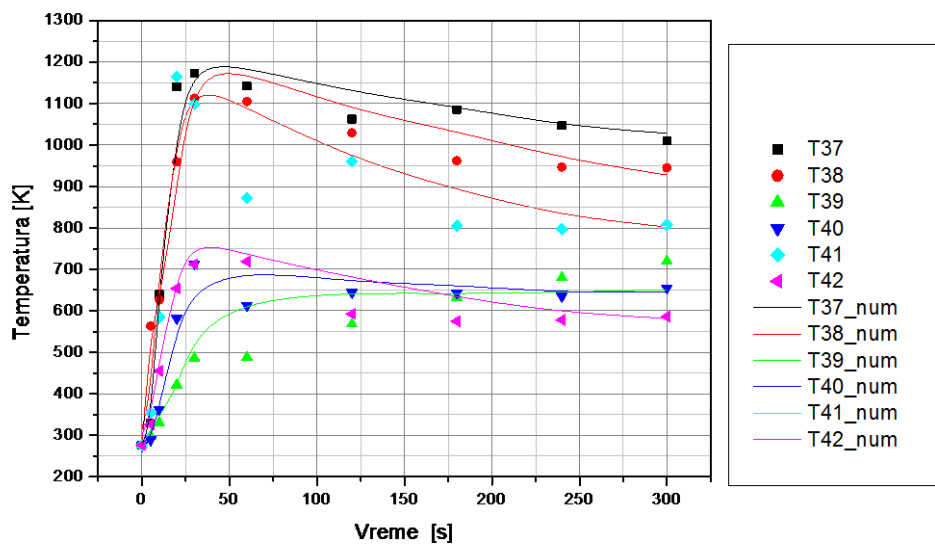
**Табела 10.1.11.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д за пожарни тест БВ09 (слика 5.8.)

Температуре у К на мерниом месту Д												
Време у s	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	281	279	278	278	277	277	278	276	276	276	279	276
5	288	285	289	284	278	278	280	278	278	277	284	277
10	354	335	352	336	312	291	286	284	284	282	314	281
20	708	689	748	645	520	386	341	344	350	336	517	330
30	955	1019	1086	945	684	501	433	437	450	417	743	397
60	1015	1104	1031	876	746	593	477	506	502	447	853	421
120	994	1115	1040	873	747	567	495	502	505	450	907	419
180	985	1136	1140	1005	788	595	528	525	542	477	934	439
240	959	1131	1167	1074	826	634	561	554	575	499	959	461
300	931	1139	1177	1114	851	661	587	575	592	529	979	482

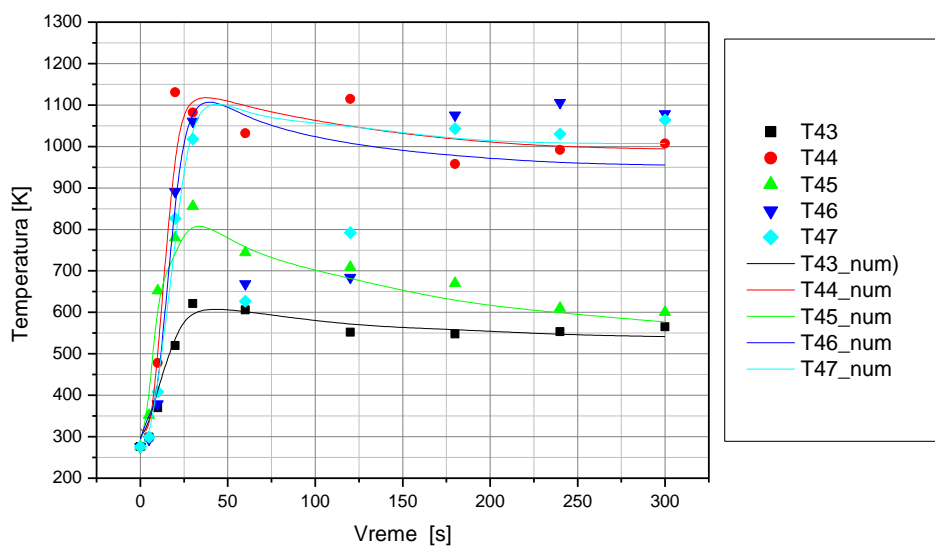


**Слика 10.1.19** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц





Слика 10.1.20 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



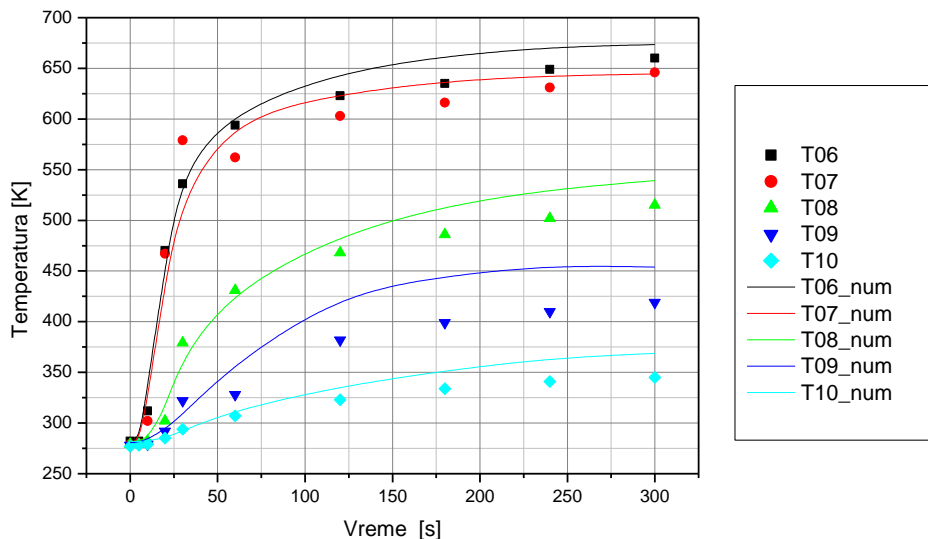
Слика 10.1.21 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц

**Табела 10.1.12.** Промена температуре ваздуха мерној равни Ц за пожарни тест БВ09 (слика 5.9.)

Температуре у К на мерној равни Ц									
Време у s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	276	276	276	276	276	276	276	276	276
5	288	339	487	387	292	292	330	563	298
10	333	673	968	716	365	379	640	626	330
20	690	1157	1170	834	499	648	1140	959	422
30	787	1055	1209	885	595	872	1172	1112	486
60	743	1127	1105	864	580	665	1142	1105	488
120	785	1158	1142	774	538	664	1062	1029	568
180	929	1190	1127	757	526	679	1085	962	633
240	888	1120	1113	686	523	687	1047	947	680
300	945	1083	1137	655	529	673	1009	945	720

Температуре у К на мерној равни Ц								
Време у s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47
0	275	276	276	276	276	276	276	276
5	289	353	326	299	299	352	294	299
10	361	585	455	370	478	652	379	408
20	582	1165	654	520	1131	780	891	826
30	713	1098	712	621	1082	856	1061	1018
60	613	872	719	606	1032	744	669	627
120	644	960	592	552	1115	709	684	792
180	643	805	575	548	958	670	1076	1043
240	635	797	578	553	992	610	1106	1030
300	655	807	586	565	1007	600	1079	1064

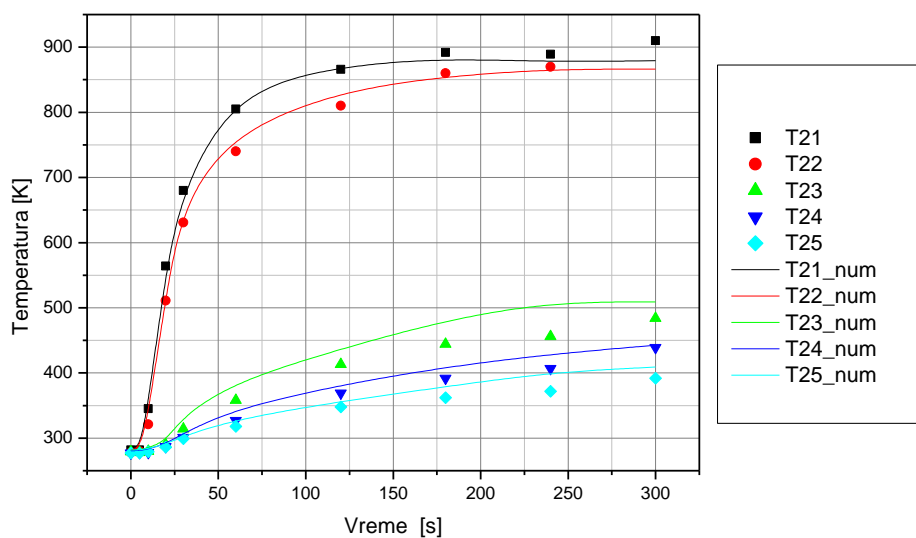
#### Експеримент 4. (БВ10)



Слика 10.1.22 Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А

Табела 10.1.13. Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А (AII) за пожарни тест БВ10 (слика 5.10.)

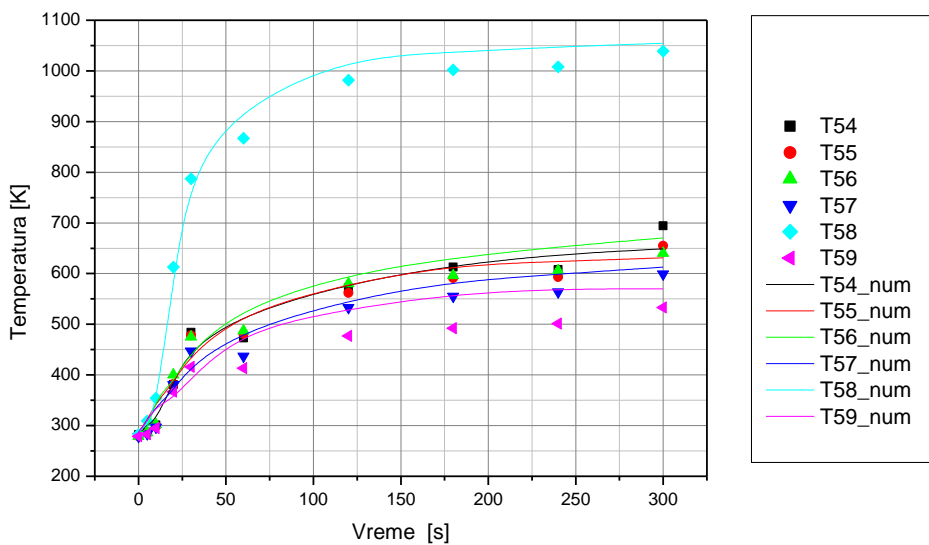
Температуре у К на мерниом месту AII					
Време у s	T06	T07	T08	T09	T10
0	282	279	279	278	277
5	282	280	279	279	278
10	312	302	282	279	279
20	470	467	302	292	285
30	536	579	379	322	294
60	594	562	431	328	307
120	623	603	468	382	323
180	635	616	486	399	334
240	649	631	502	410	341
300	660	646	515	419	345



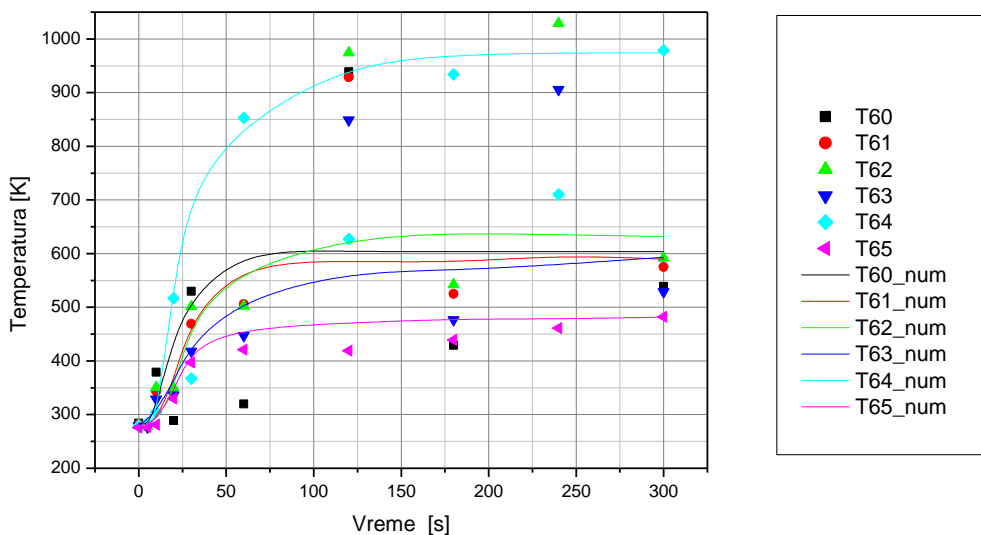
**Слика 10.1.23** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

**Табела 10.1.14.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б (*BV*) за пожарни тест БВ10 (слика 5.10.)

Температуре у К на мерниом месту <i>BV</i>					
Време у s	T21	T22	T23	T24	T25
0	282	278	279	277	277
5	282	280	278	278	277
10	345	321	280	278	279
20	564	511	290	287	286
30	680	631	314	301	299
60	805	740	358	327	318
120	866	810	413	369	348
180	892	860	444	392	362
240	889	870	456	407	372
300	910	965	484	439	392



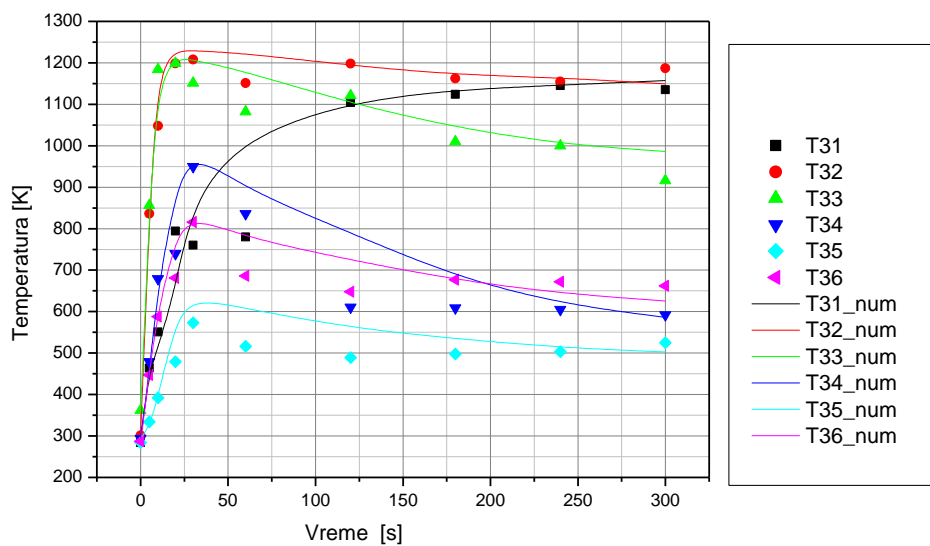
Слика 10.1.24 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



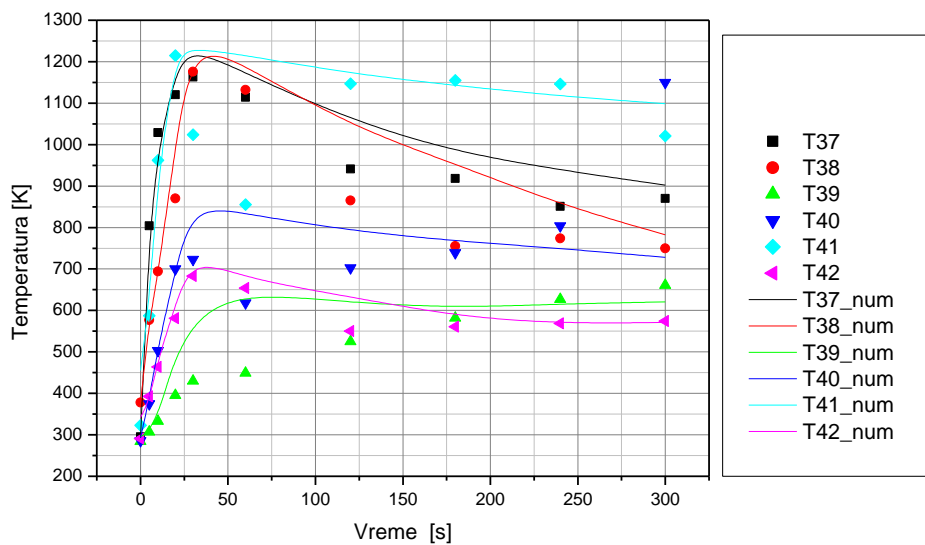
Слика 10.1.25. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д

**Табела 10.1.14.** Промена температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д за пожарни тест БВ10 (слика 5.8.)

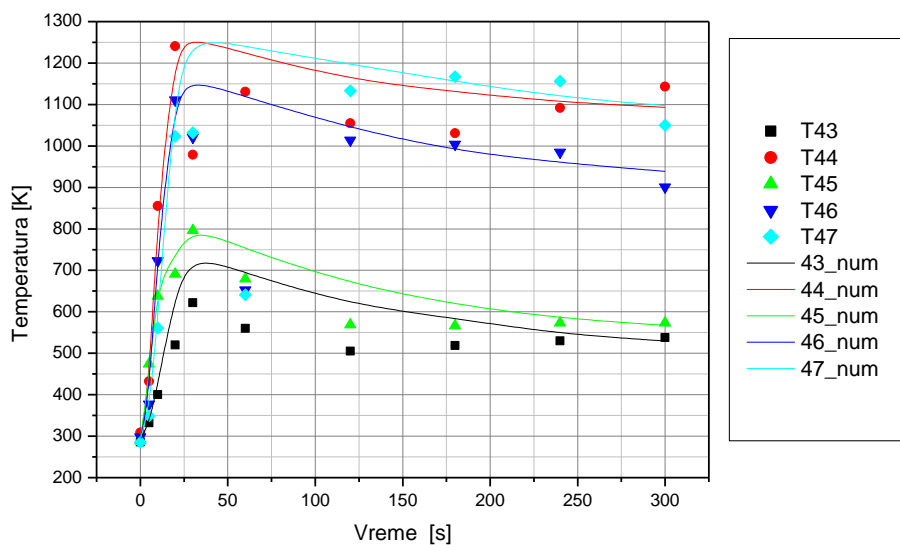
Температуре у К на мерниом месту Д												
Време у s	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	T61	T62	T63	T64	T65
0	284	282	280	279	279	279	282	279	279	279	283	279
5	379	343	351	329	305	289	287	285	286	284	309	283
10	530	469	501	418	367	320	301	299	302	297	354	295
20	939	929	974	849	627	429	381	382	400	381	613	367
30	1069	1075	1029	906	710	539	484	478	475	447	787	416
60	1046	1104	1006	845	733	589	473	481	487	437	867	413
120	1062	1158	1190	1109	873	651	572	562	580	533	982	477
180	1038	1147	1190	1150	929	697	613	591	596	555	1002	492
240	1010	1143	1188	1133	944	701	608	593	606	564	1008	501
300	1035	1158	1204	1220	1160	857	694	655	640	599	1039	533



**Слика 10.1.26** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



Слика 10.1.27 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц



Слика 10.1.28 Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха на мерној равни Ц

**Табела 10.1.15.** Промена температуре ваздуха мерној равни Ц за пожарни тест БВ10 (слика 5.9.)

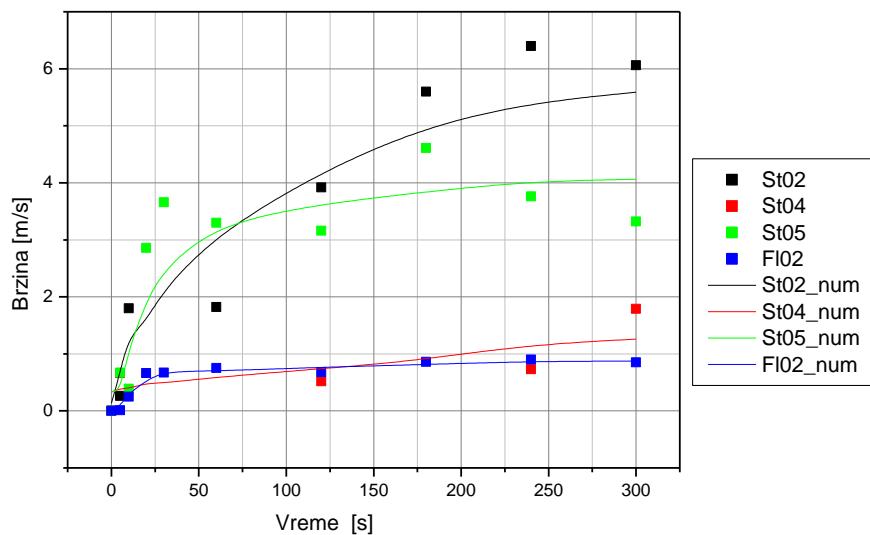
Температуре у К на мерној равни Ц									
Време у s	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39
0	284	301	362	294	284	287	295	378	284
5	464	836	856	479	334	447	804	577	307
10	551	1048	1184	679	392	588	1029	694	333
20	794	1199	1199	740	479	681	1120	870	395
30	760	1208	1151	950	573	816	1163	1176	430
60	780	1151	1082	836	516	686	1114	1132	449
120	1104	1198	1121	611	489	648	941	865	525
180	1124	1162	1010	609	498	677	918	755	582
240	1145	1155	1000	605	503	672	851	774	627
300	1135	1187	916	592	525	662	870	750	661

Температуре у К на мерној равни Ц								
Време у s	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47
0	286	323	291	286	309	289	298	285
5	375	587	393	332	432	474	377	349
10	503	962	464	400	855	638	723	561
20	700	1215	581	520	1241	691	1111	1023
30	723	1024	683	622	979	796	1021	1032
60	618	855	654	560	1131	679	653	641
120	703	1147	550	505	1055	569	1014	1133
180	739	1155	561	519	1031	566	1004	1167
240	804	1146	569	530	1092	573	985	1156
300	1150	1021	574	538	1143	573	901	1050

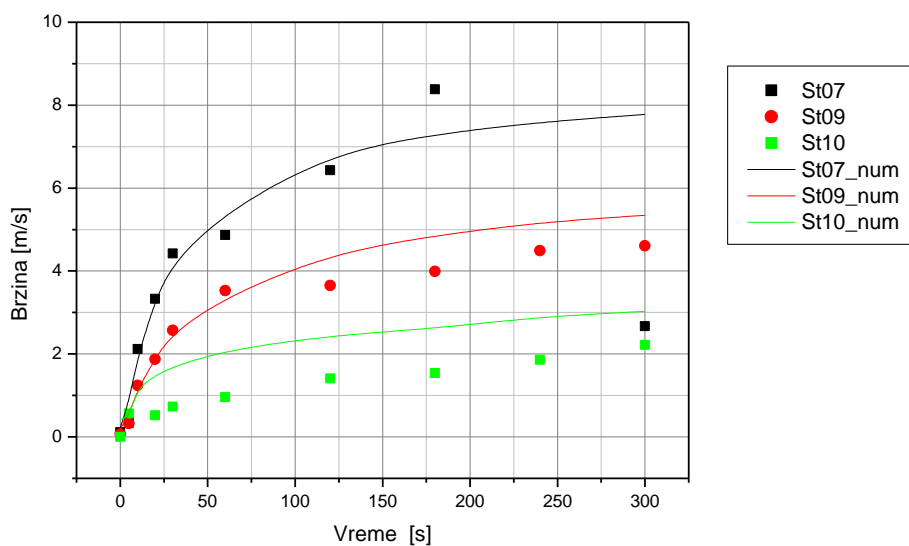


## 10.2. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем основног модела

### Експеримент 1. (БВ07)



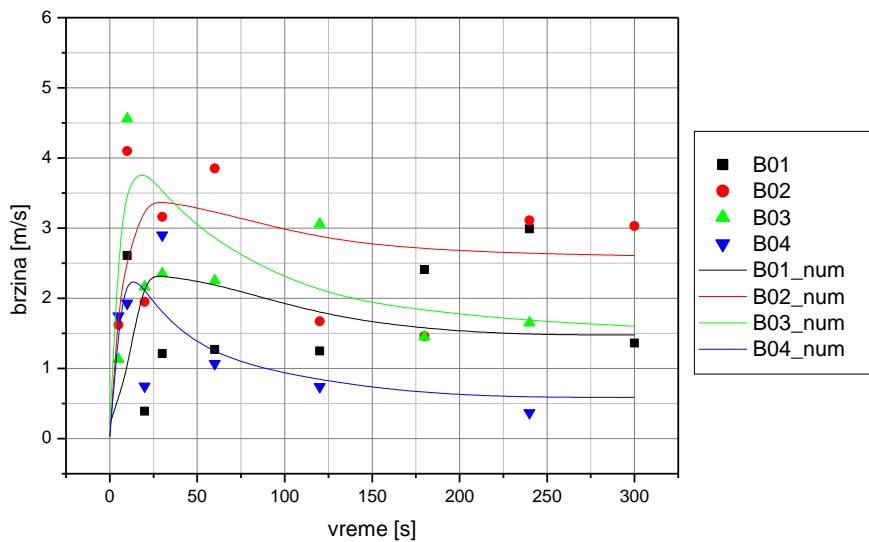
Слика 10.2.1. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А



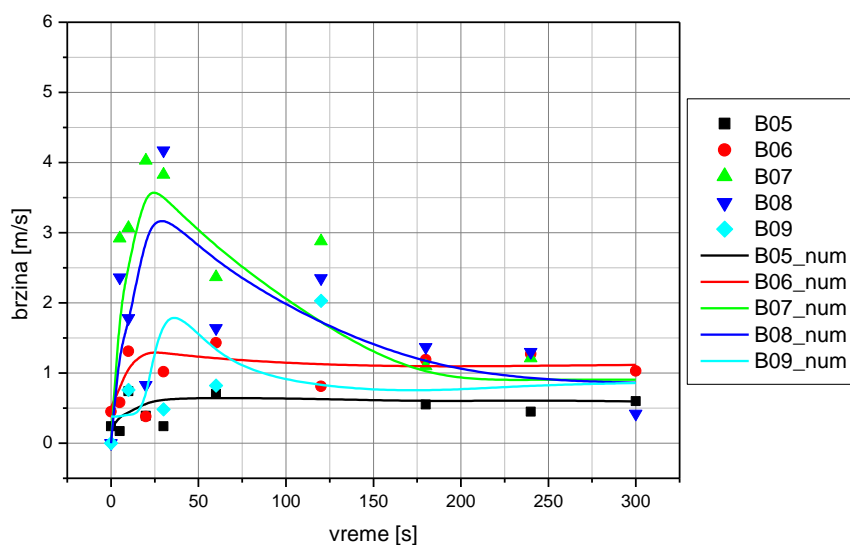
Слика 10.2.2. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

**Табела 10.2.1.** Промена брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А (*AII*) и Б (*BV*) за пожарни тест БВ07 (слика 5.10.)

Брзине у m/s на мерним местима <i>AII</i> и <i>BV</i>								
Време у s	мерно место <i>AII</i>				мерно место <i>BV</i>			
	St02	St04	St05	Fl02	St07	St09	St10	Fl05
0	NaN	NaN	NaN	0	0,11	0,07	NaN	НЕУСПЕШНО
5	0,26	0,66	0,67	0,01	0,34	0,32	0,56	
10	1,8	NaN	0,39	0,25	2,12	1,24	NaN	
20	NaN	NaN	2,86	0,66	3,33	1,87	0,52	
30	NaN	NaN	3,66	0,67	4,42	2,57	0,73	
60	1,82	NaN	3,3	0,75	4,87	3,53	0,96	
120	3,92	0,52	3,16	0,68	6,43	3,65	1,41	
180	5,6	NaN	4,61	0,86	8,38	3,99	1,54	
240	6,4	0,73	3,76	0,9	NaN	4,49	1,86	
300	6,06	1,79	3,32	0,85	2,67	4,61	2,22	



**Слика 10.2.3.** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц

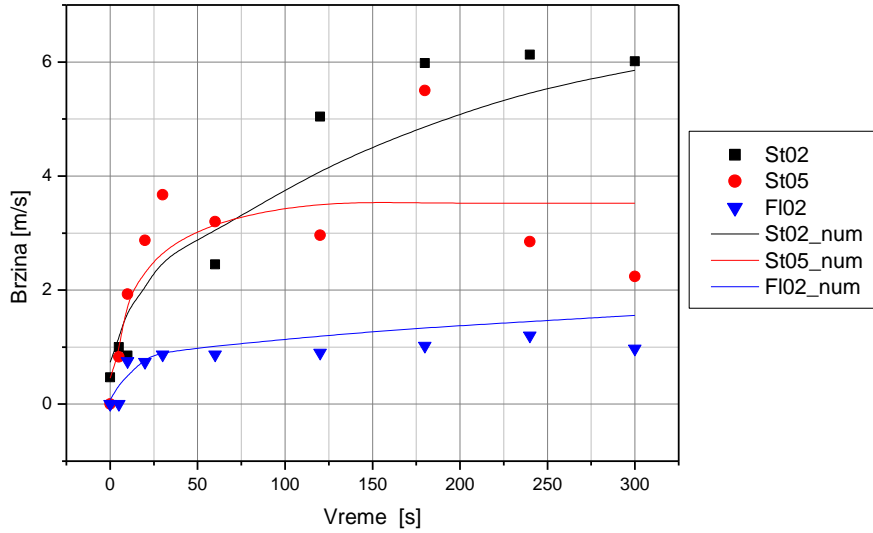


Слика 10.2.4. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц

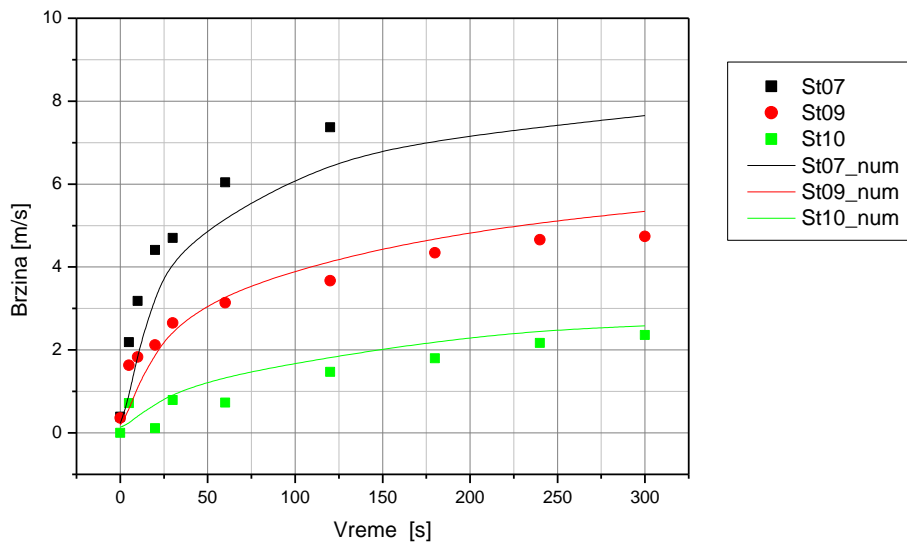
Табела 10.2.2. Промена брзине ваздуха на мерној равни Ц за пожарни тест БВ07 (слика 5.13.)

Време у s	Брзине у m/s на мерној равни Ц								
	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	NaN	0	NaN	NaN	0,24	0,45	NaN	0	0
5	NaN	1,62	1,13	1,75	0,17	0,58	2,92	2,36	NaN
10	2,61	4,1	4,56	1,93	0,74	1,31	3,07	1,78	0,76
20	0,39	1,95	2,16	0,75	0,39	0,38	4,03	0,83	NaN
30	1,21	3,16	2,35	2,9	0,24	1,02	3,83	4,17	0,48
60	1,27	3,85	2,25	1,07	0,7	1,43	2,37	1,64	0,82
120	1,25	1,67	3,06	0,74	NaN	0,81	2,88	2,35	2,03
180	2,41	1,46	1,45	NaN	0,55	1,19	1,1	1,37	NaN
240	2,99	3,11	1,65	0,37	0,45	1,27	1,21	1,3	NaN
300	1,36	3,03	NaN	NaN	0,6	1,03	NaN	0,42	NaN

## Експеримент 2. (БВ08)



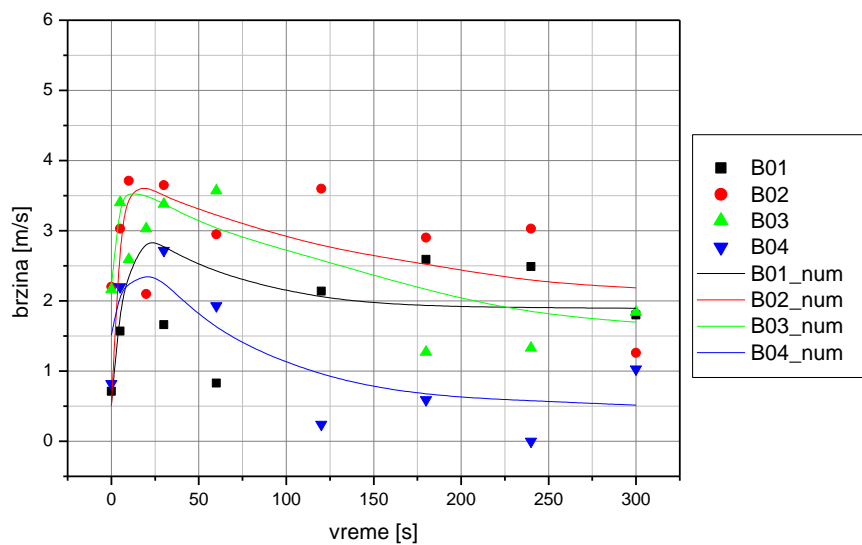
Слика 10.2.5. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А



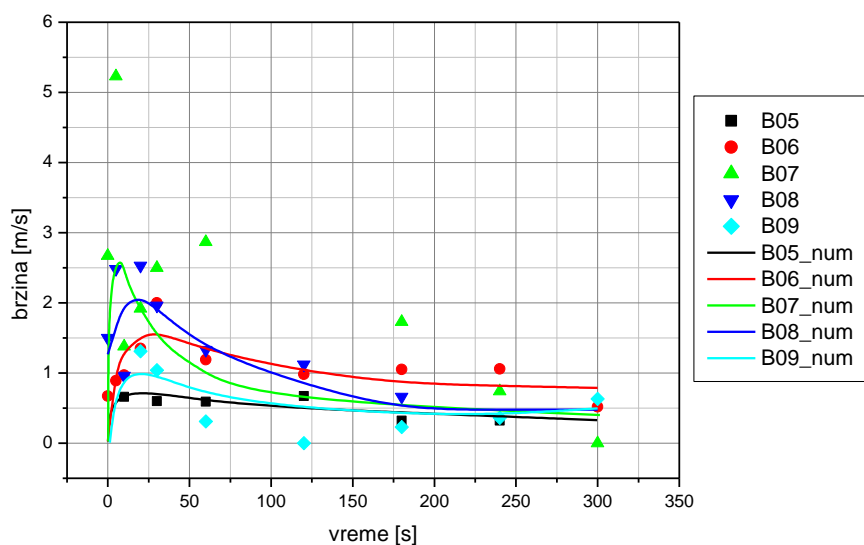
Слика 10.2.6. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

**Табела 10.2.3.** Промена брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А (*AII*) и Б (*BV*) за пожарни тест БВ08 (слика 5.10.)

Брзине у m/s на мерним местима <i>AII</i> и <i>BV</i>								
		мерно место <i>AII</i>				мерно место <i>BV</i>		
Време у s	St02	St04	St05	Fl02	St07	St09	St10	Fl05
0	0,47	неуспешно	NaN	0,00	0,39	0,36	0	неуспешно
5	1		0,83	0,00	2,19	1,63	0,72	
10	0,85		1,93	0,75	3,18	1,83	NaN	
20	NaN		2,87	0,74	4,41	2,12	0,11	
30	NaN		3,67	0,87	4,7	2,65	0,79	
60	2,45		3,2	0,87	6,04	3,14	0,73	
120	5,04		2,96	0,9	7,37	3,67	1,47	
180	5,98		5,5	1,02	15,8	4,34	1,8	
240	6,13		2,85	1,2	16,71	4,66	2,17	
300	6,01		2,24	0,97	10,45	4,74	2,36	



**Слика 10.2.7.** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц

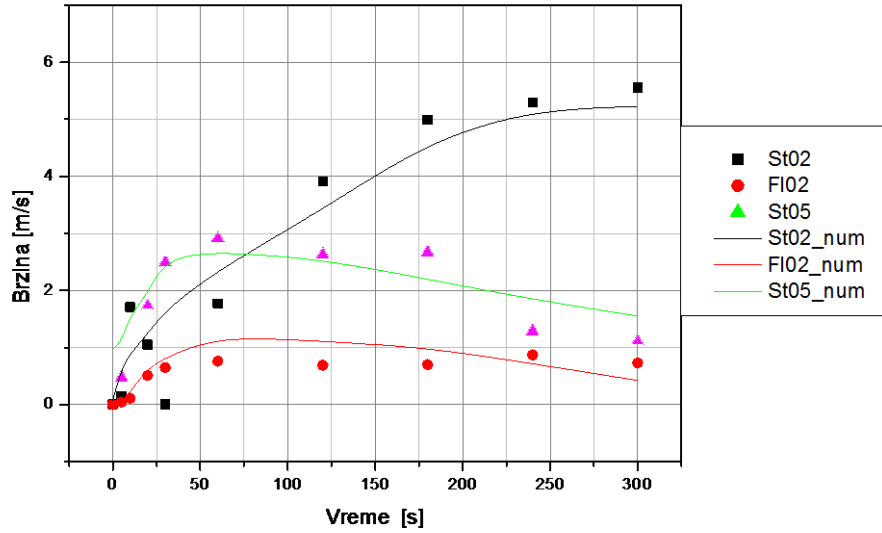


Слика 10.2.8. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц

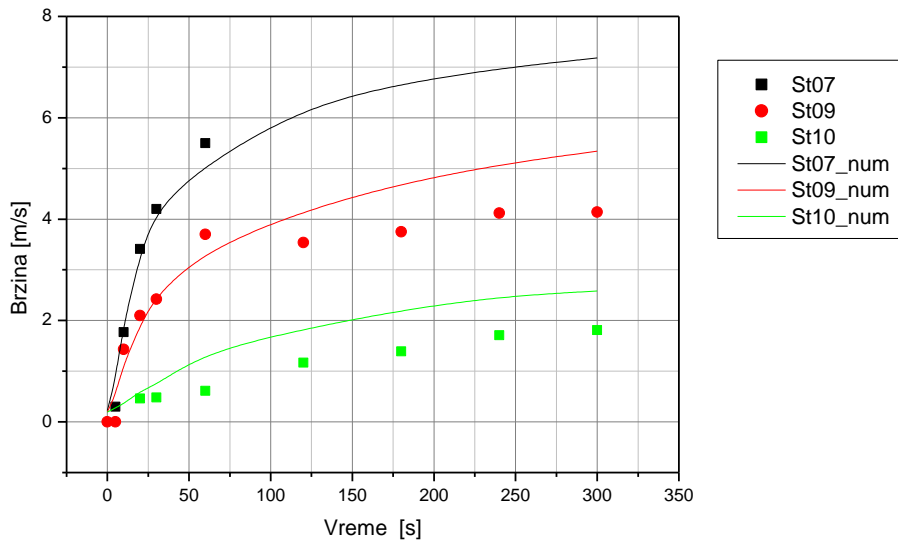
Табела 10.2.4. Промена брзине ваздуха на мерној равни Ц за пожарни тест БВ08 (слика 5.13.)

Време у s	Брзине у m/s на мерној равни Ц								
	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	0,71	2,2	2,16	0,82	NaN	0,67	2,67	1,5	NaN
5	1,57	3,03	3,4	2,2	NaN	0,89	5,23	2,48	NaN
10	NaN	3,71	2,59	NaN	0,66	0,97	1,38	0,96	NaN
20	NaN	2,1	3,03	NaN	NaN	1,35	1,92	2,53	1,31
30	1,66	3,65	3,38	2,72	0,6	2	2,5	1,96	1,04
60	0,83	2,95	3,57	1,93	0,59	1,19	2,87	1,33	0,31
120	2,14	3,6	NaN	0,24	0,67	0,98	NaN	1,12	0
180	2,59	2,9	1,27	0,59	0,32	1,05	1,73	0,66	0,23
240	2,49	3,03	1,33	0	0,32	1,06	0,74	NaN	0,36
300	1,8	1,26	1,84	1,03	NaN	0,52	0	NaN	0,63

### Експеримент 3. (БВ09)



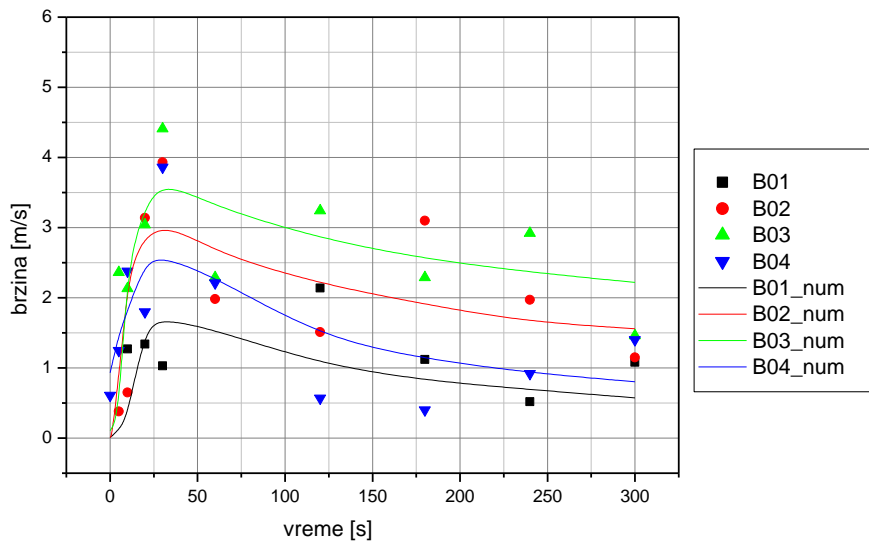
Слика 10.2.9. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А



Слика 10.2.10. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

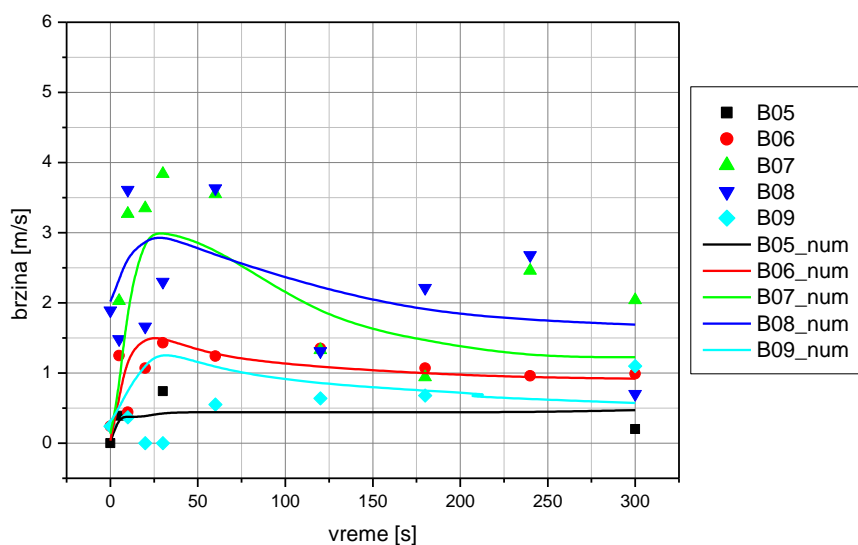
**Табела 10.2.5** Промена брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А (*AII*) и Б (*BV*) за пожарни тест БВ09 (слика 5.10.)

Брзине у m/s на мерним местима <i>AII</i> и <i>BV</i>								
	мерно место <i>AII</i>				мерно место <i>BV</i>			
Време у s	St02	St04	St05	Fl02	St07	St09	St10	Fl05
0	0	неуспешно	NaN	0	NaN	0	NaN	неуспешно
5	0,15		0,48	0,04	0,3	0	NaN	
10	1,71		NaN	0,11	1,77	1,43	NaN	
20	1,05		1,73	0,51	3,41	2,1	0,46	
30	0		2,5	0,65	4,2	2,42	0,48	
60	1,77		2,92	0,76	5,5	3,7	0,61	
120	3,91		2,64	0,69	NaN	3,54	1,17	
180	4,99		2,67	0,7	NaN	3,75	1,39	
240	5,29		1,29	0,87	NaN	4,12	1,71	
300	5,56		1,11	0,73	NaN	4,14	1,81	



**Слика 10.2.11.** Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц



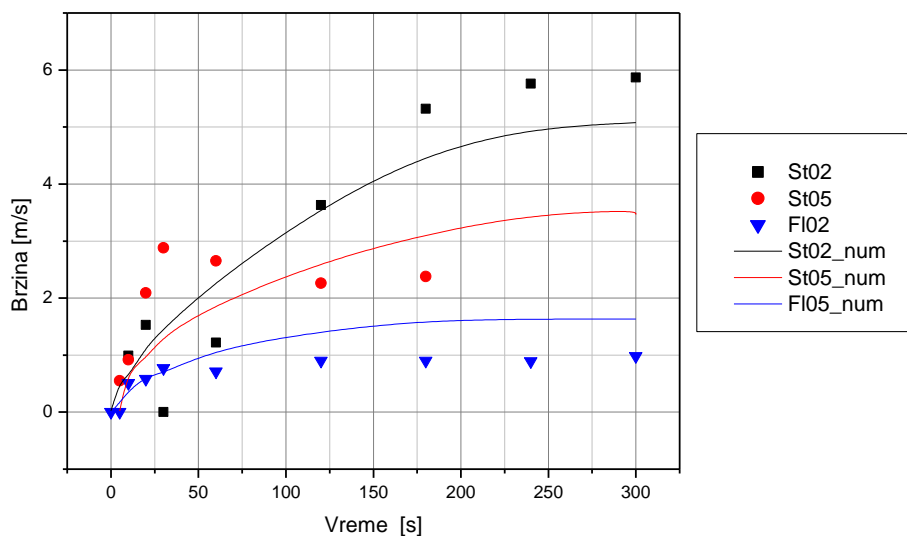


Слика 10.2.12. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц

Табела 10.2.6. Промена брзине ваздуха на мерној равни Ц за пожарни тест БВ09 (слика 5.13.)

Време у s	Брзине у m/s на мерној равни Ц								
	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	NaN	NaN	NaN	0,61	NaN	0,24	NaN	1,89	0,24
5	NaN	0,38	2,36	1,25	0,39	1,25	2,03	1,48	NaN
10	1,27	0,65	2,13	2,38	NaN	0,44	3,27	3,61	0,37
20	1,34	3,14	3,04	1,8	NaN	1,07	3,35	1,66	0
30	1,03	3,93	4,41	3,86	0,74	1,43	3,84	2,3	0
60	NaN	1,98	2,29	2,21	NaN	1,24	3,55	3,63	0,55
120	2,14	1,51	3,24	0,57	NaN	1,35	1,33	1,31	0,64
180	1,12	3,1	2,29	0,4	NaN	1,07	0,94	2,21	0,68
240	0,52	1,97	2,92	0,92	NaN	0,96	2,46	2,68	NaN
300	1,08	1,15	1,46	1,4	NaN	0,99	2,04	0,7	1,1

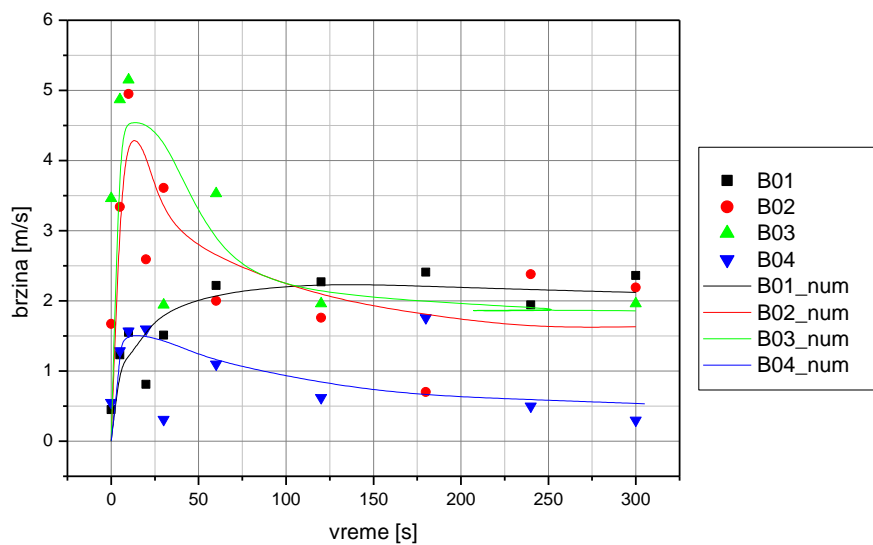
#### Эксперимент 4. (БВ10)



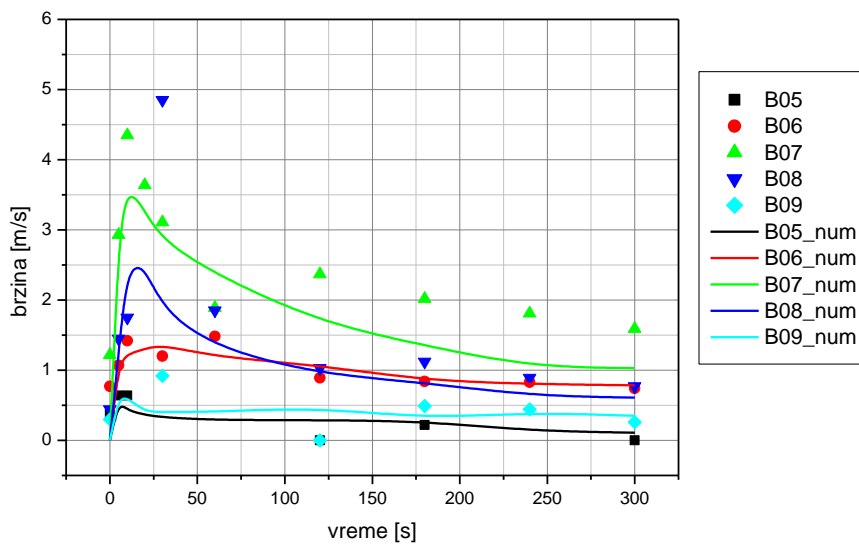
Слика 10.2.13. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А

Табела 10.2.7. Промена брзине ваздуха у оси тунела на мерном месту А ( *AII* ) и Б ( *BV* ) за пожарни тест БВ10 (слика 5.10.)

Брзине у m/s на мерним местима <i>AII</i> и <i>BV</i>								
	мерно место <i>AII</i>				мерно место <i>BV</i>			
Време у s	St02	St04	St05	FI02	St07	St09	St10	FI05
0	NaN	неуспешно	NaN	0	0,62	0,44	0	неуспешно
5	NaN		0,55	0	NaN	0,2	0,75	
10	0,99		0,92	0,51	NaN	NaN	NaN	
20	1,53		2,09	0,58	NaN	NaN	NaN	
30	0		2,88	0,77	NaN	NaN	NaN	
60	1,22		2,65	0,71	NaN	NaN	NaN	
120	3,63		2,26	0,9	0,77	NaN	NaN	
180	5,32		2,38	0,9	NaN	NaN	0,3	
240	5,76		NaN	0,89	NaN	NaN	0	
300	5,87		NaN	0,98	NaN	NaN	0,86	



Слика 10.2.14. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц



Слика 10.2.15. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене брзине ваздуха на мерној равни Ц

**Табела 10.2.8.** Промена брзине ваздуха на мерној равни Ц за пожарни тест БВ10  
(слика 5.13.)

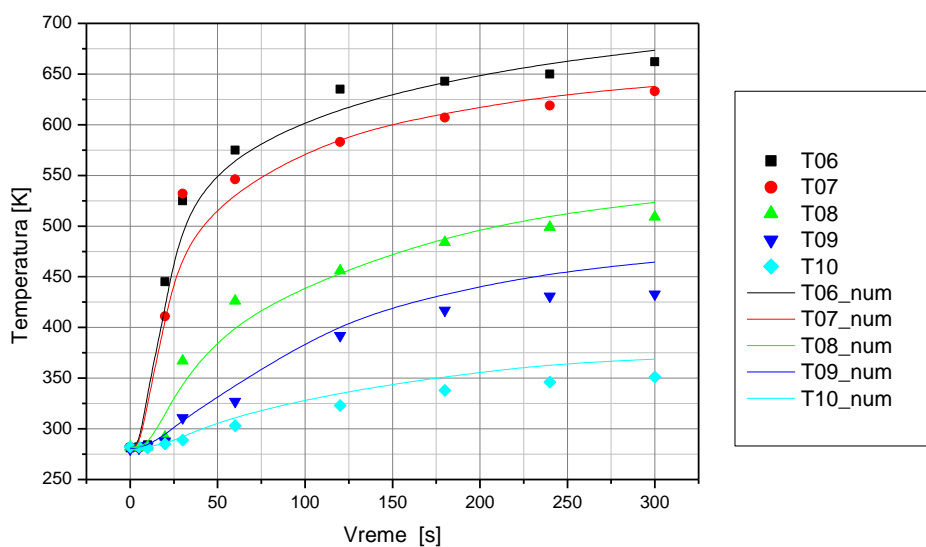
Време у s	Брзине у m/s на мерној равни Ц								
	BID01	BID02	BID03	BID04	BID05	BID06	BID07	BID08	BID09
0	0,45	1,67	3,46	0,55	0,38	0,77	1,22	0,44	0,3
5	1,23	3,34	4,87	1,29	0,64	1,07	2,93	1,45	NaN
10	1,55	4,95	5,15	1,57	0,64	1,42	4,35	1,75	NaN
20	0,81	2,59	NaN	1,6	NaN	NaN	3,64	NaN	NaN
30	1,51	3,61	1,94	0,31	NaN	1,2	3,11	4,85	0,92
60	2,22	2	3,53	1,1	NaN	1,48	1,89	1,85	NaN
120	2,27	1,76	1,96	0,62	0	0,89	2,37	1,03	0
180	2,41	0,7	NaN	1,76	0,22	0,84	2,02	1,12	0,49
240	1,94	2,38	NaN	0,5	NaN	0,83	1,81	0,89	0,44
300	2,36	2,19	NaN	NaN	0	0,74	1,59	NaN	0,26

### ПРИЛОГ 3:

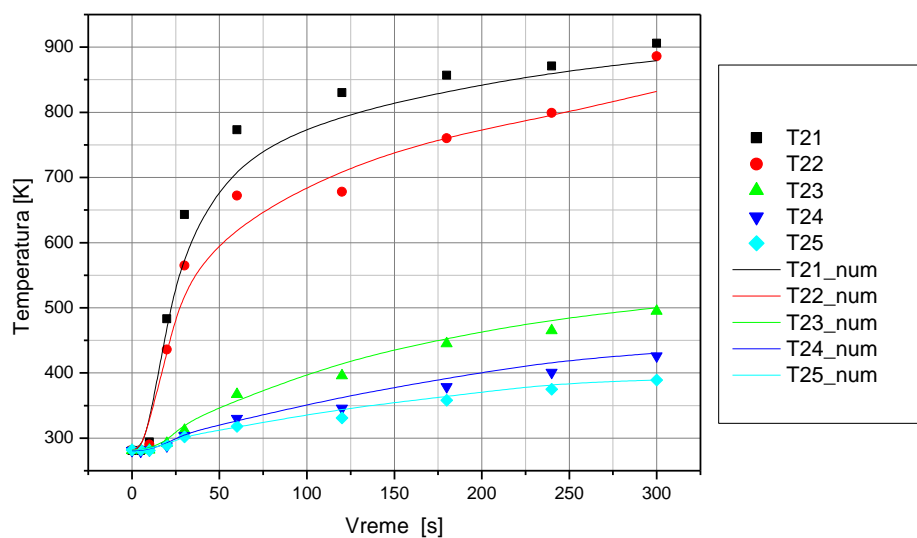
## **11. Поређење температура и брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела**

### **11.1. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела**

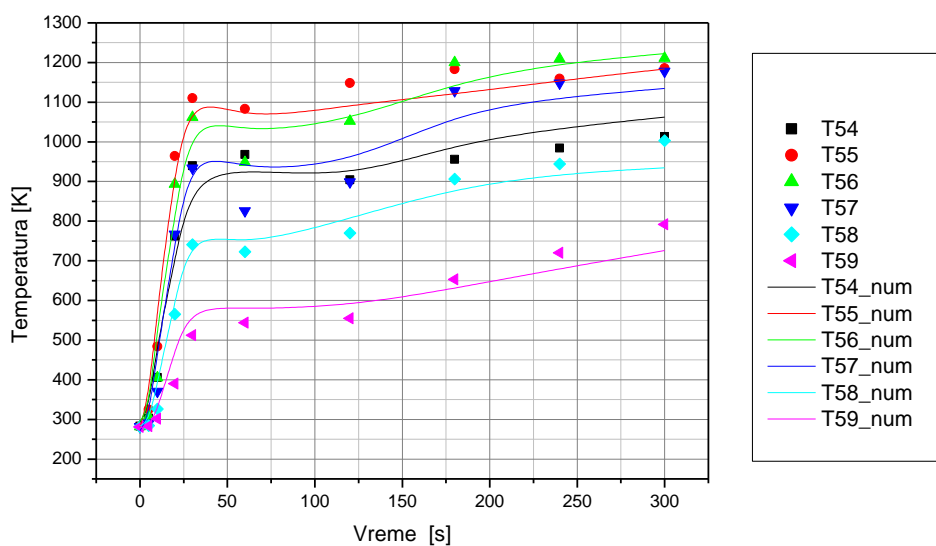
#### **Експеримент 1. (БВ07)**



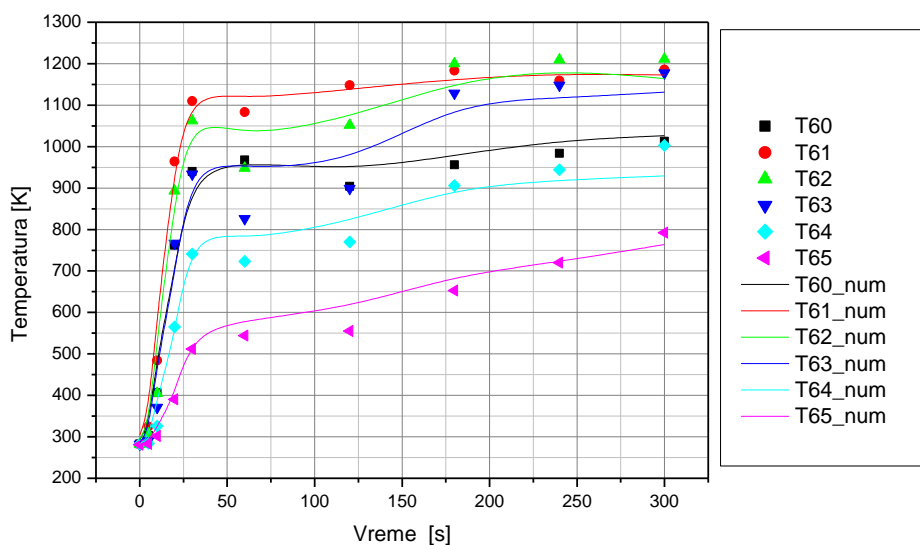
**Слика 11.1.1.** Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту А



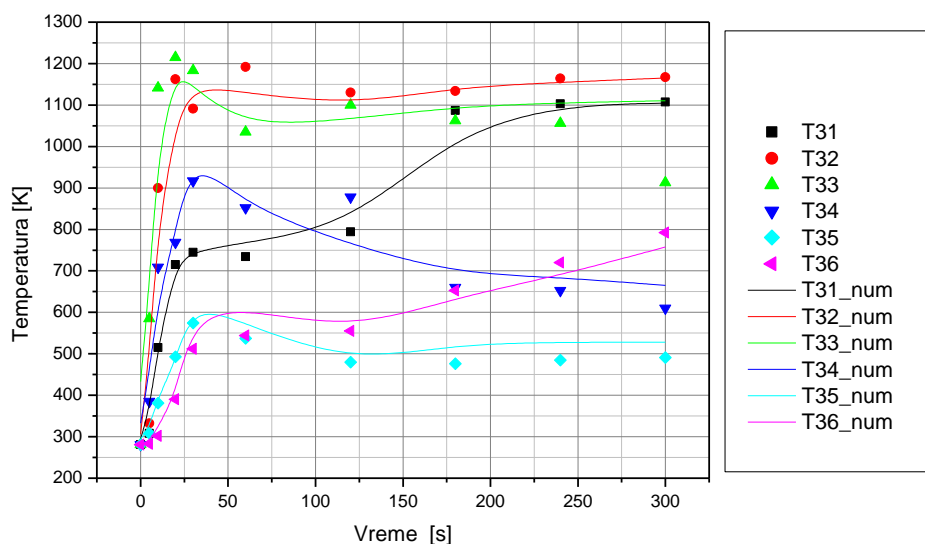
Слика 11.1.2. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту Б



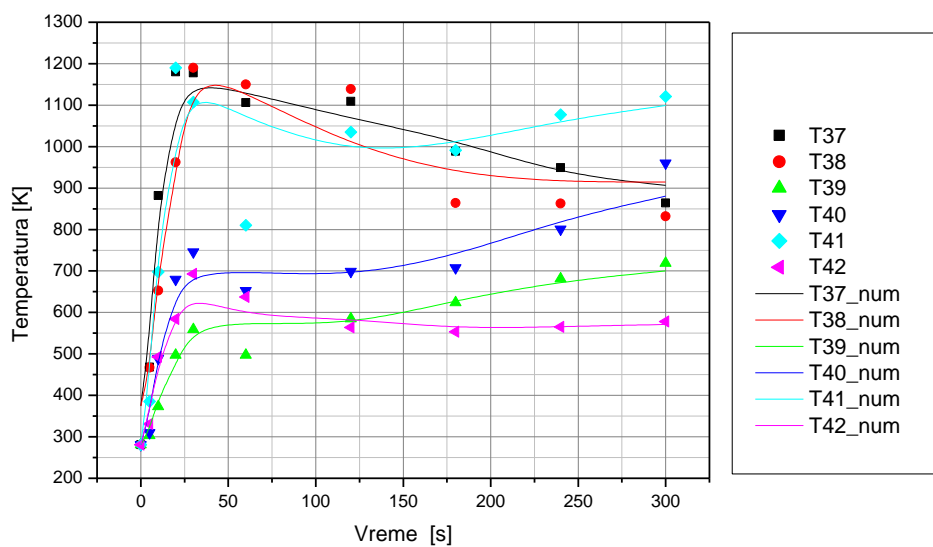
Слика 11.1.3. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту Д



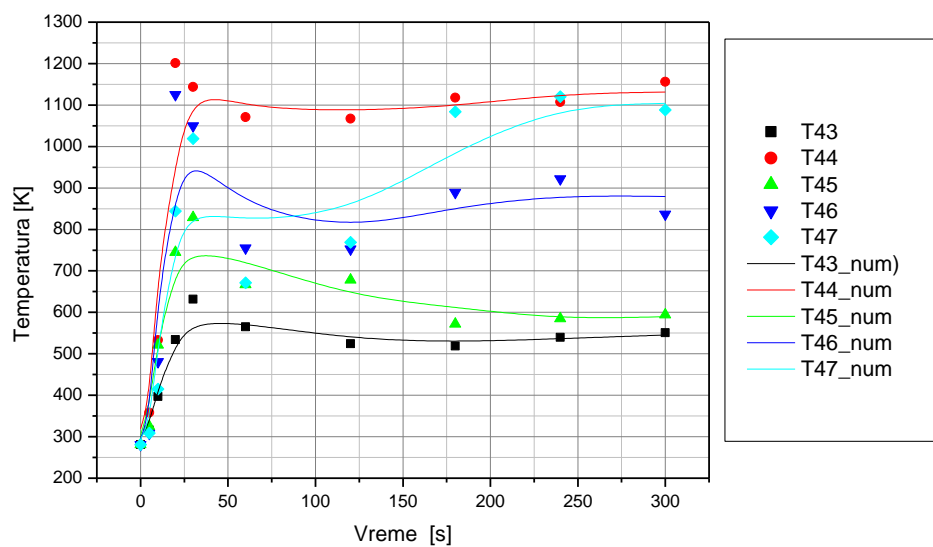
Слика 11.1.4. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту Д



Слика 11.1.5. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц



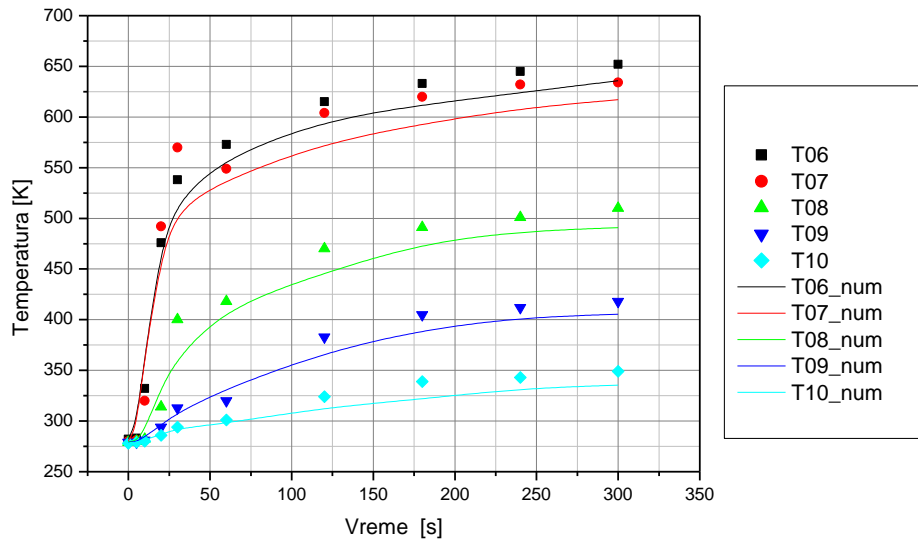
Слика 11.1.6. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц



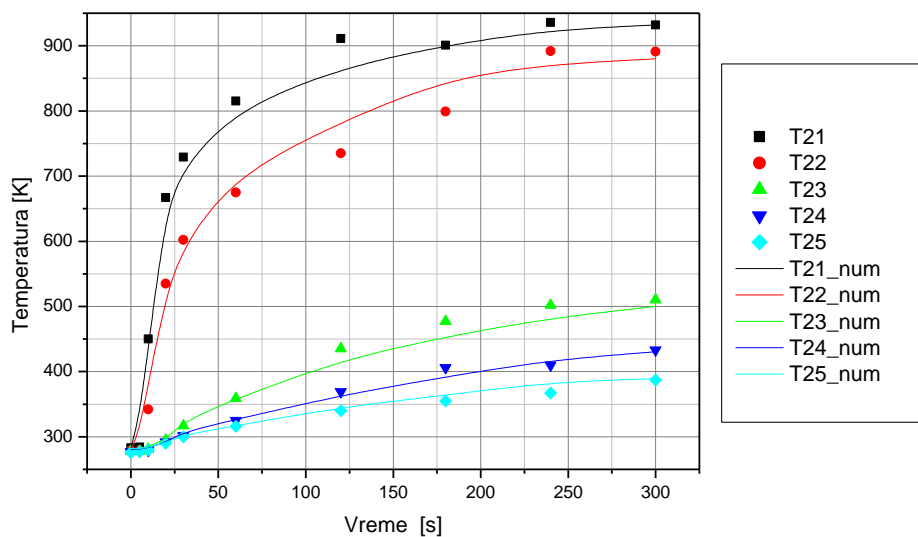
Слика 11.1.7. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц



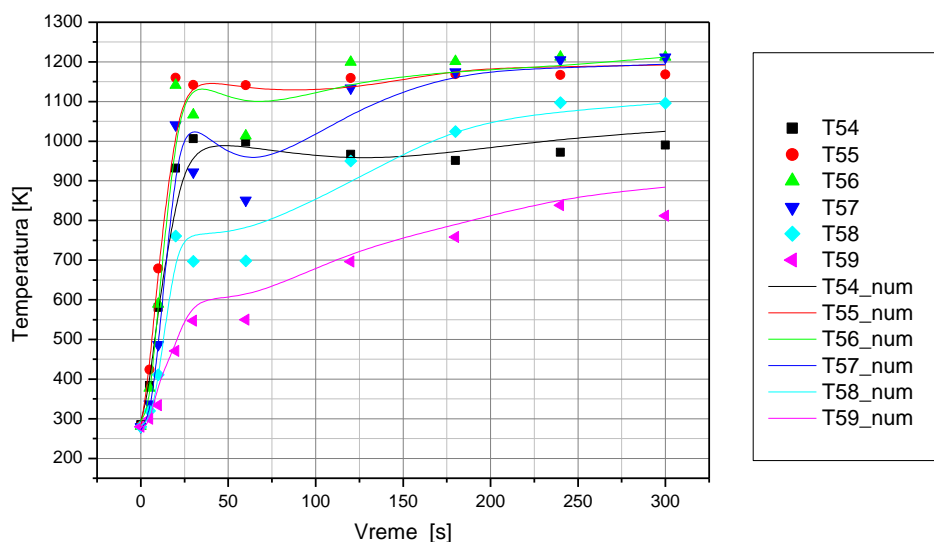
## Експеримент 2. (БВ08)



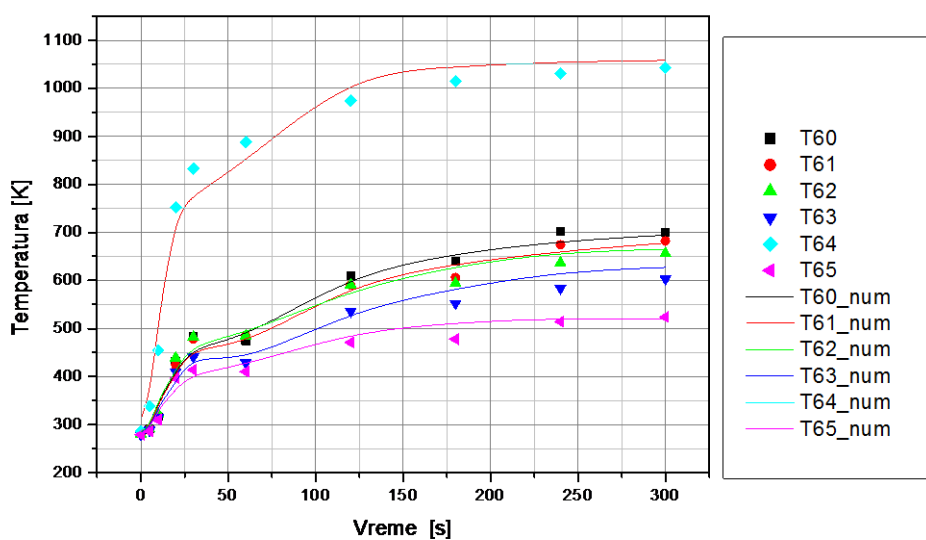
Слика 11.1.8. Поређење температура ваздуха добијених експерименталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту А



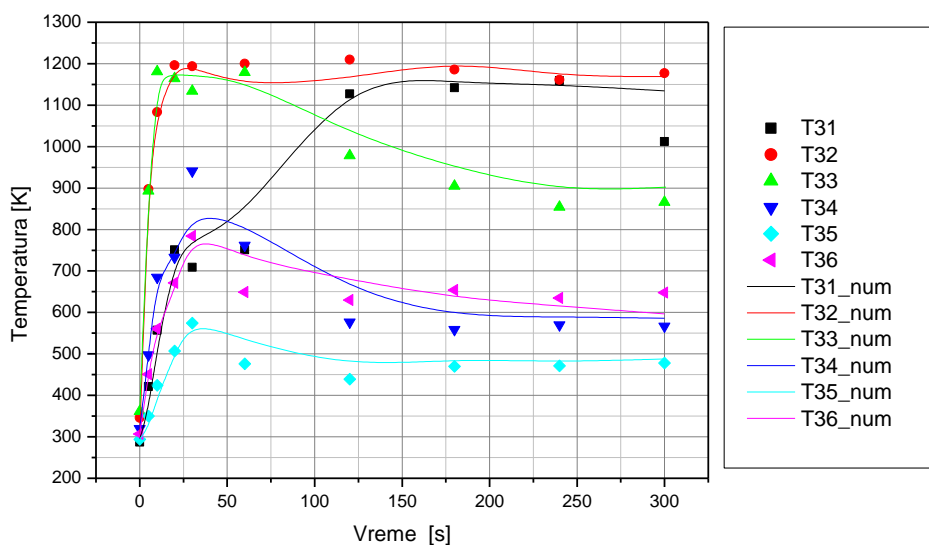
Слика 11.1.9. Поређење температура ваздуха добијених експерименталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту Б



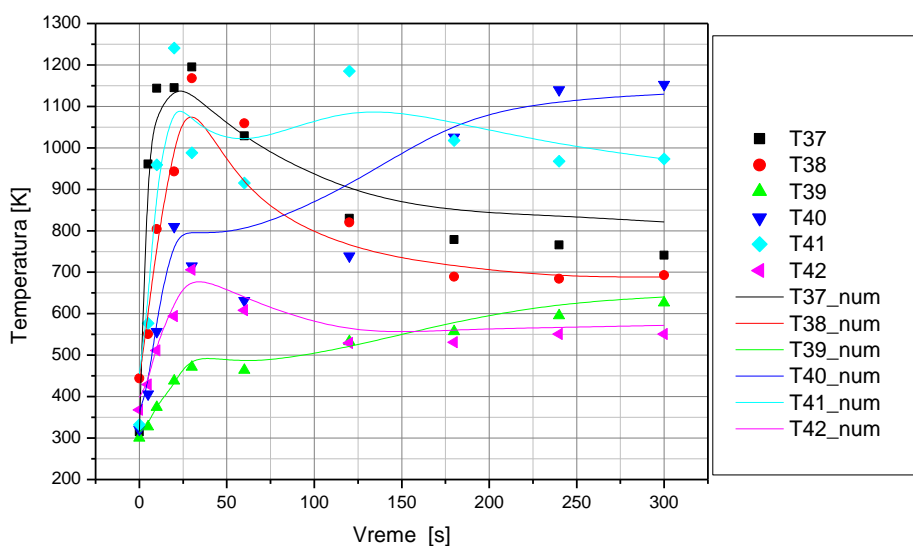
Слика 11.1.10. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту Д



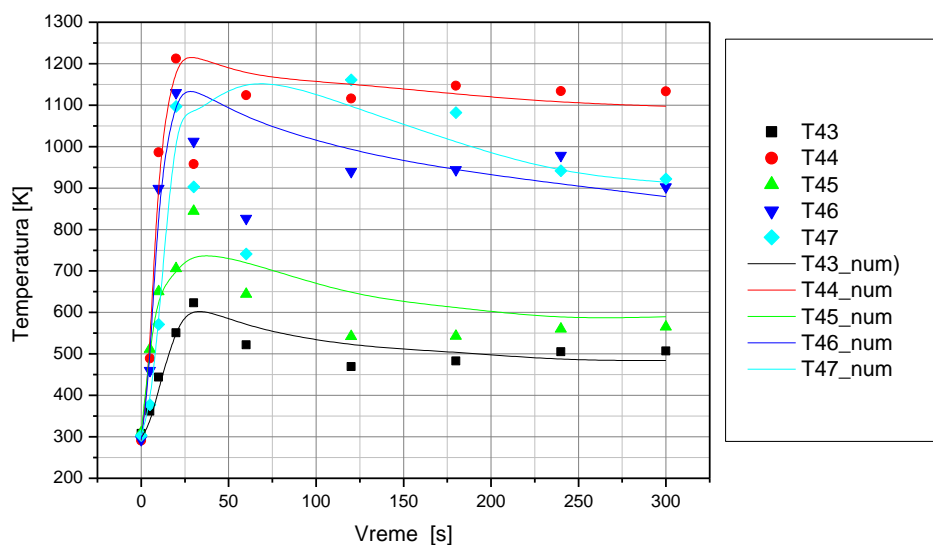
Слика 11.1.11. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерном месту Д



Слика 11.1.12. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

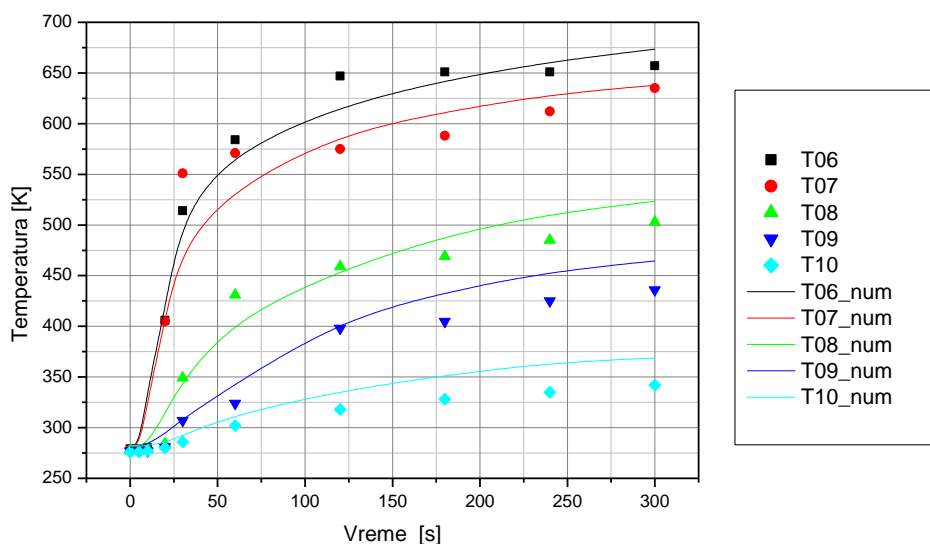


Слика 11.1.13. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

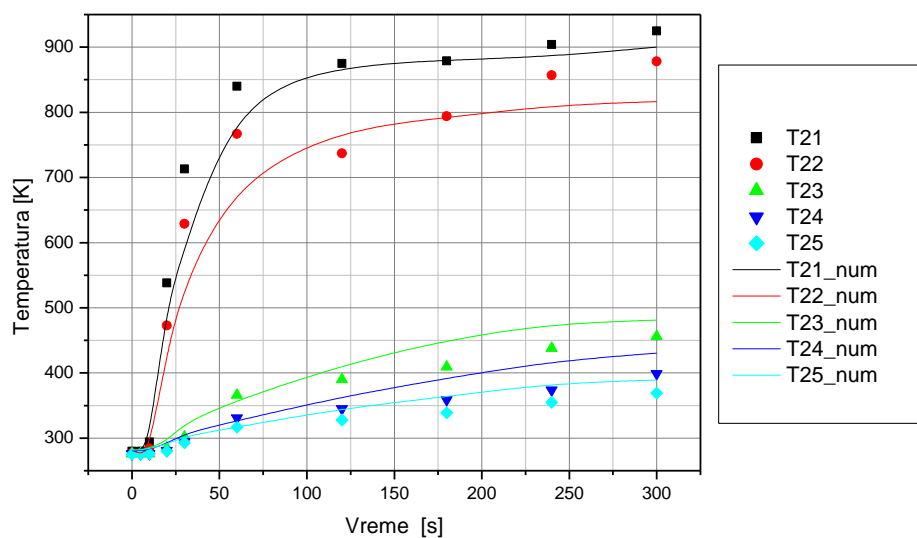


Слика 11.1.14. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

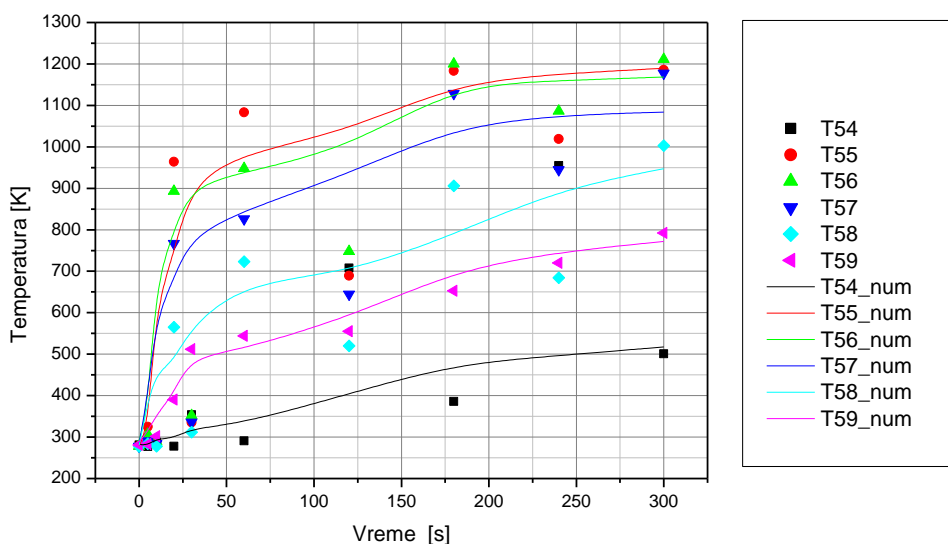
### Експеримент 3. (БВ09)



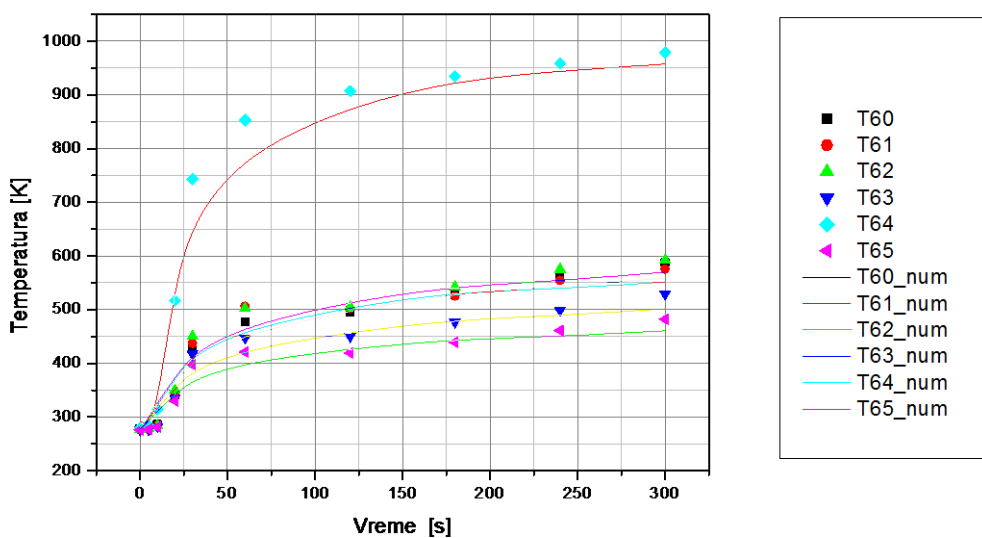
Слика 11.1.15. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температура ваздуха у оси тунела на мерном месту А



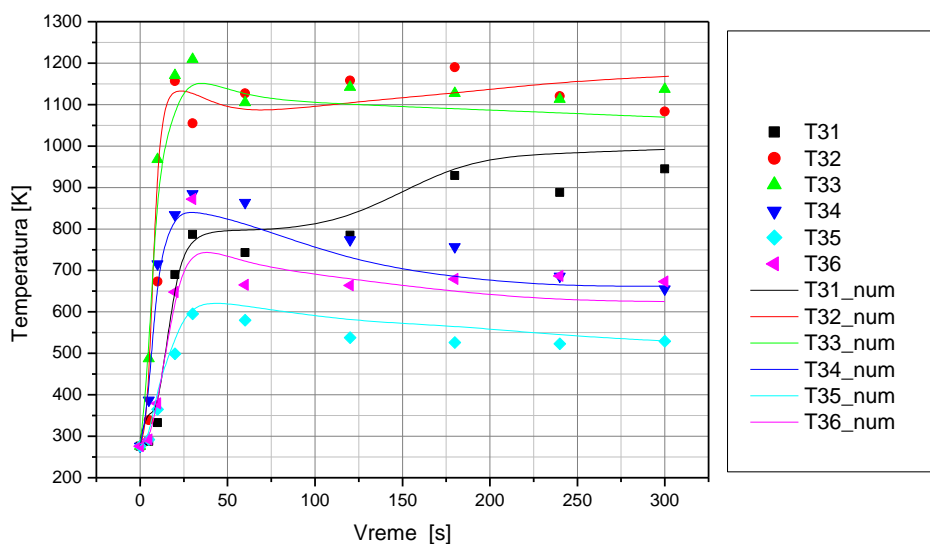
Слика 11.1.16. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б



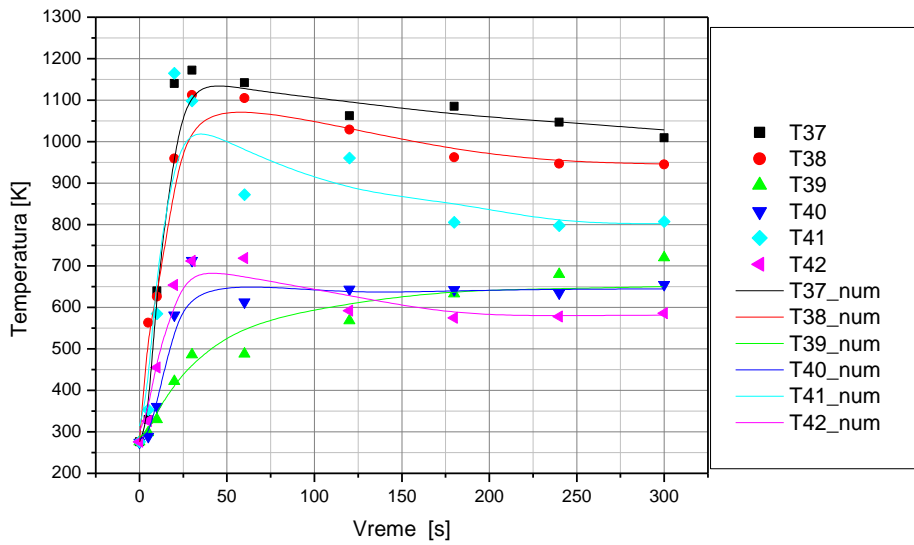
Слика 11.1.17. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



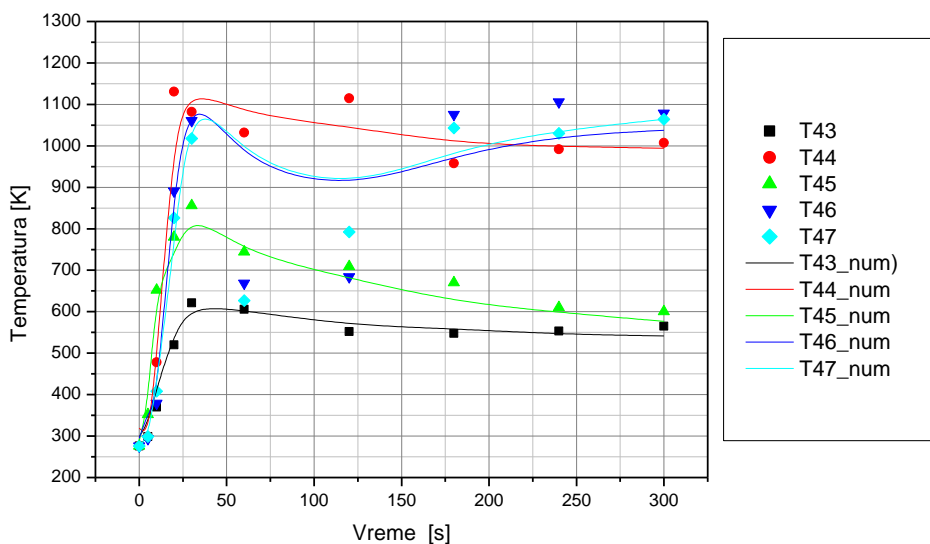
Слика 11.1.18. Поређење експиременталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



Слика 11.1.19. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

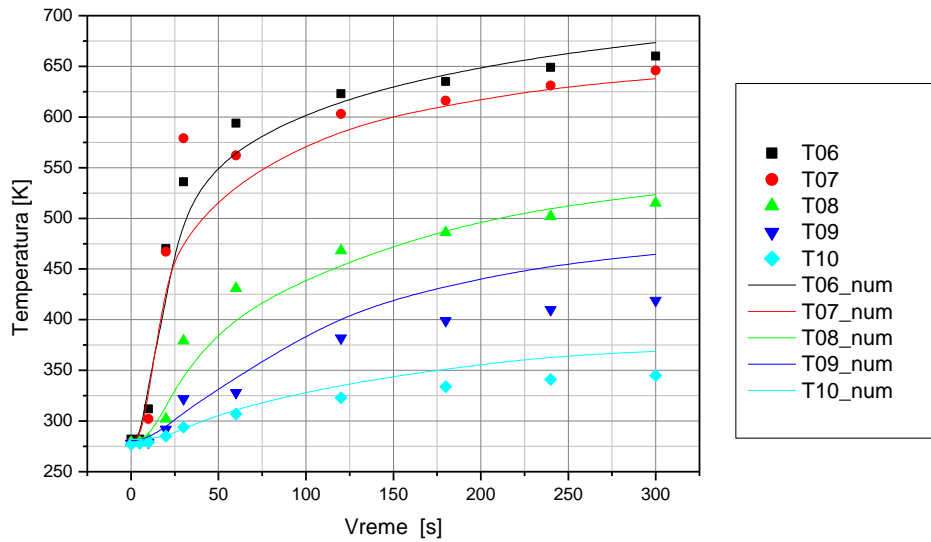


Слика 11.1.20. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

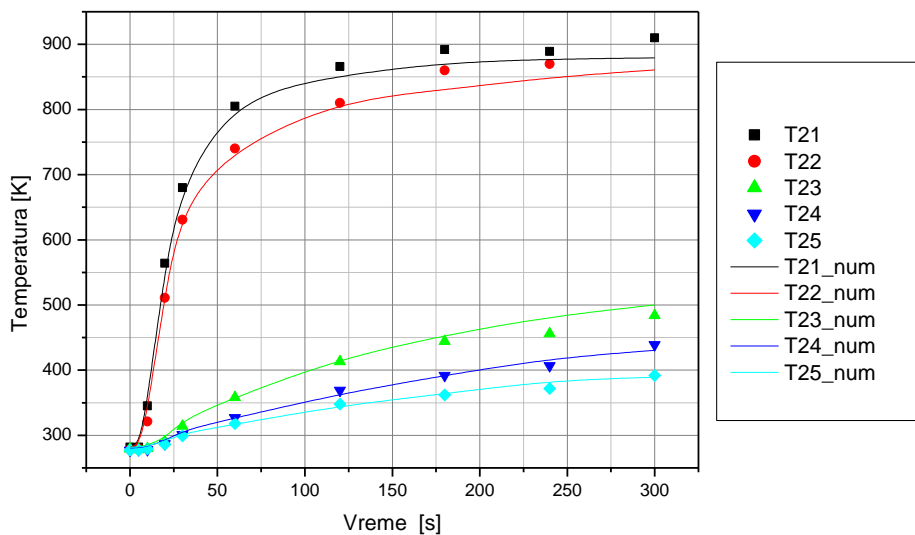


Слика 11.1.21. Поређење температура ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

#### Експеримент 4. (БВ10)

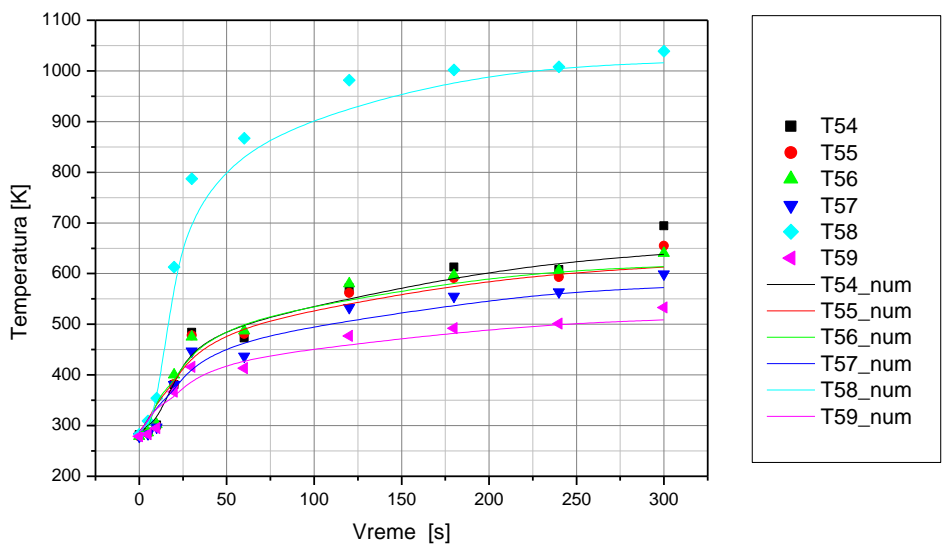


Слика 11.1.22. Поредица експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту А

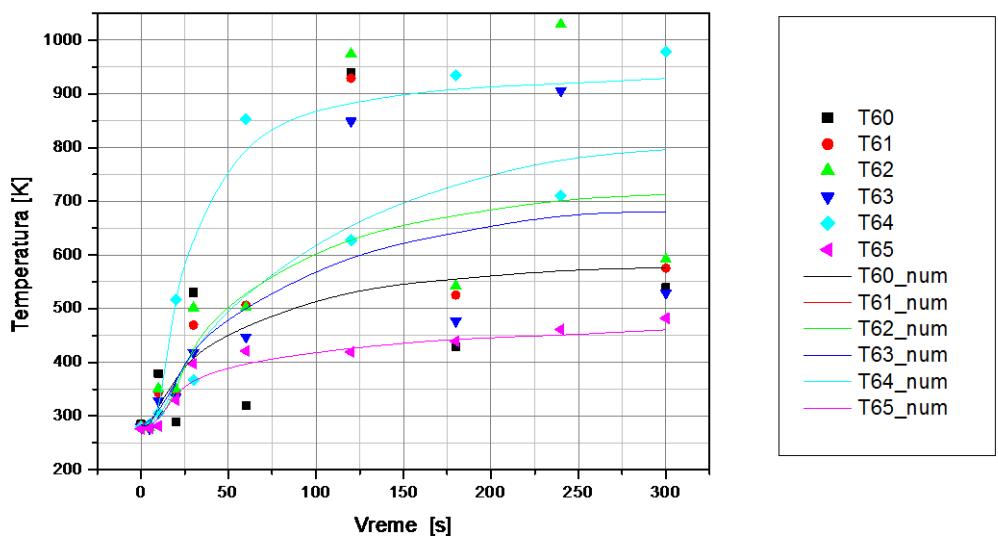


Слика 11.1.23. Поредица експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

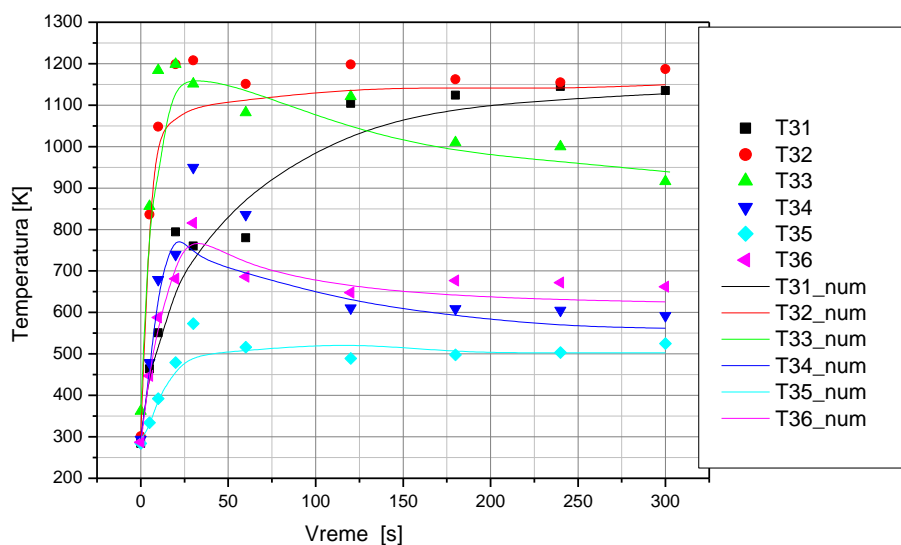




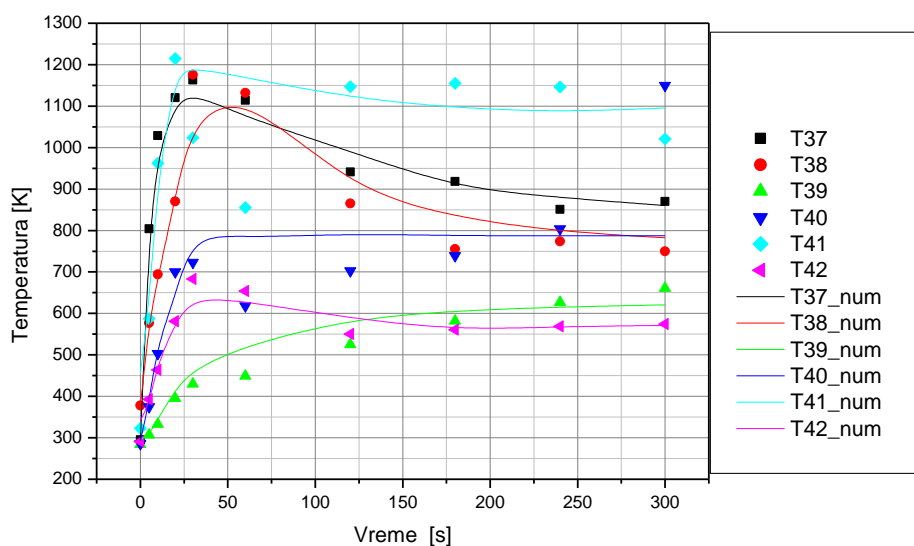
Слика 11.1.24. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



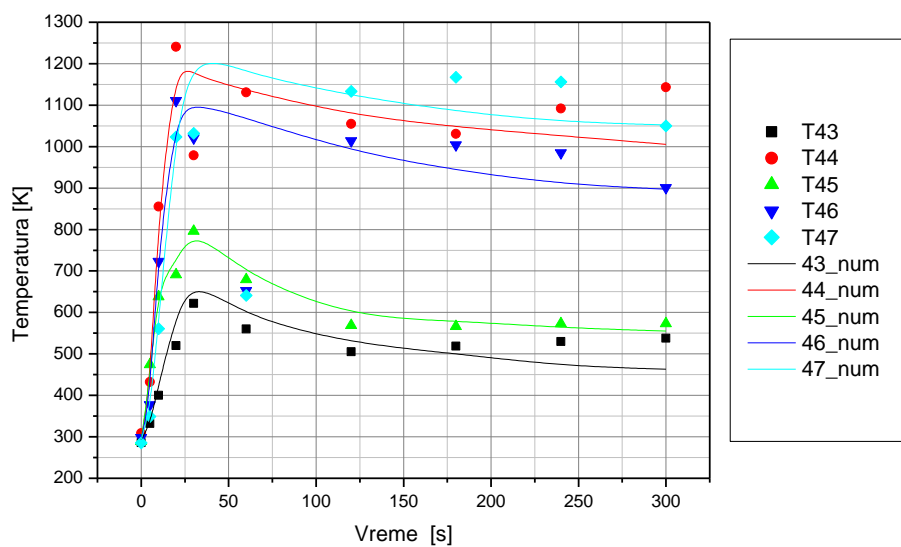
Слика 11.1.25. Поређење експерименталних и резултата нумеричких симулација промене температуре ваздуха у оси тунела на мерном месту Д



Слика 11.1.26. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц



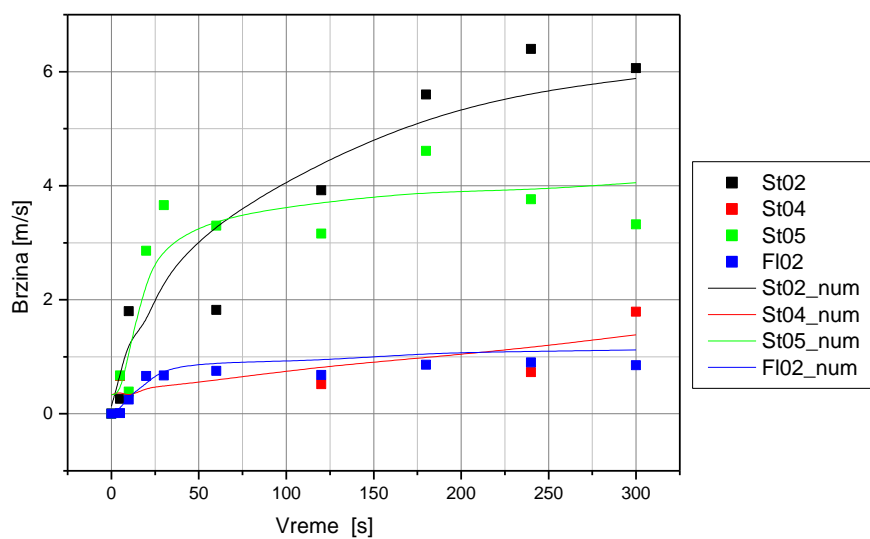
Слика 11.1.27. Поређење температура ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц



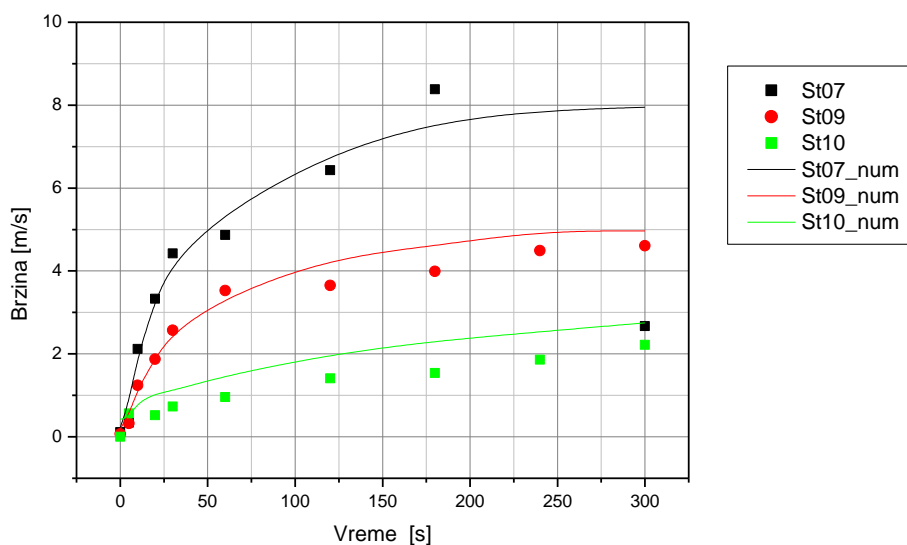
**Слика 11.1.28.** Поређење температура ваздуха добијених експиремнталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела у оси тунела на мерној равни Ц

## 11.2. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем основног модела

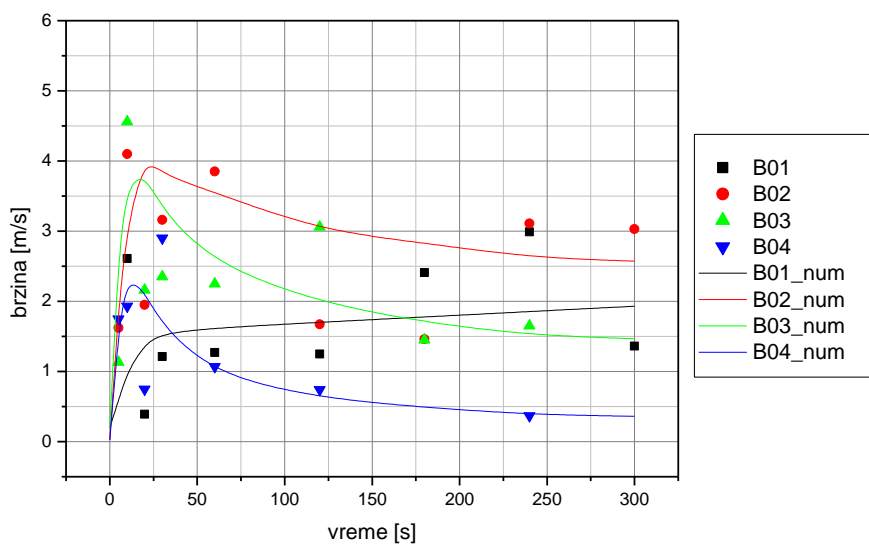
### Експеримент 1. (БВ07)



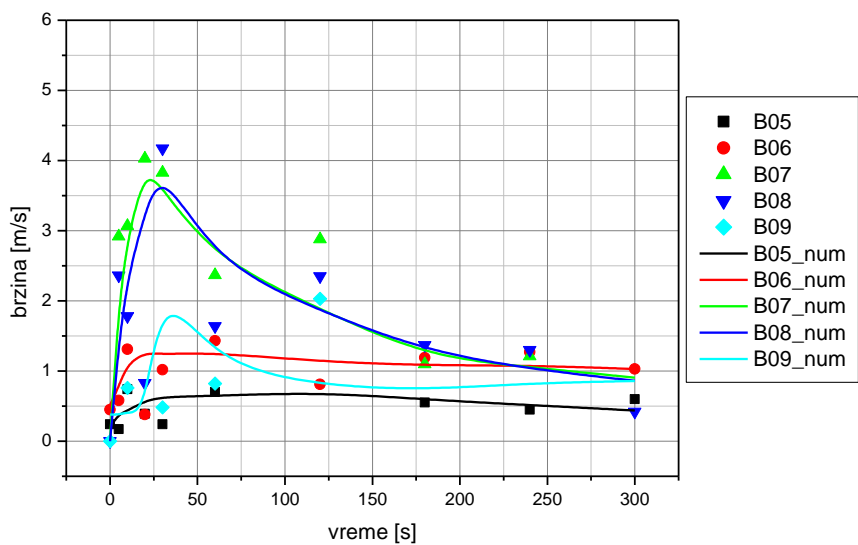
Слика 11.2.1. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту А



**Слика 11.2.2.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

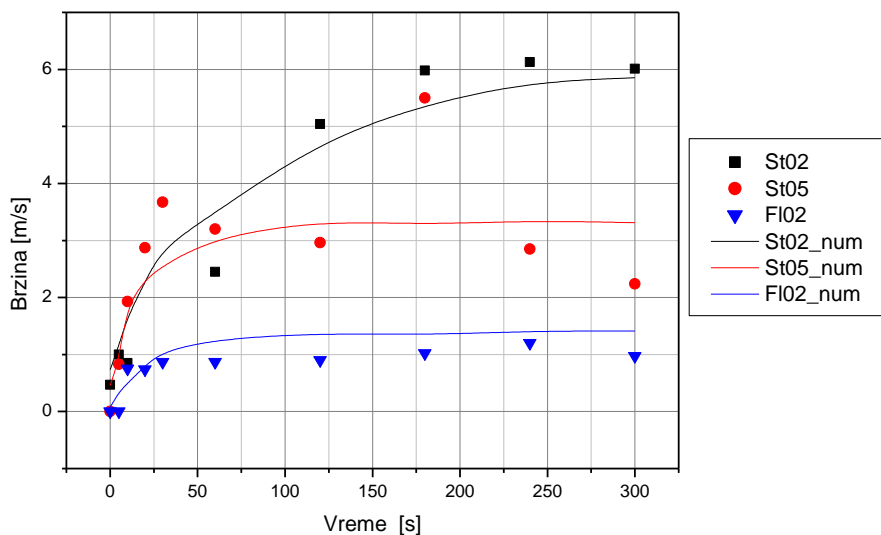


**Слика 11.2.3.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц

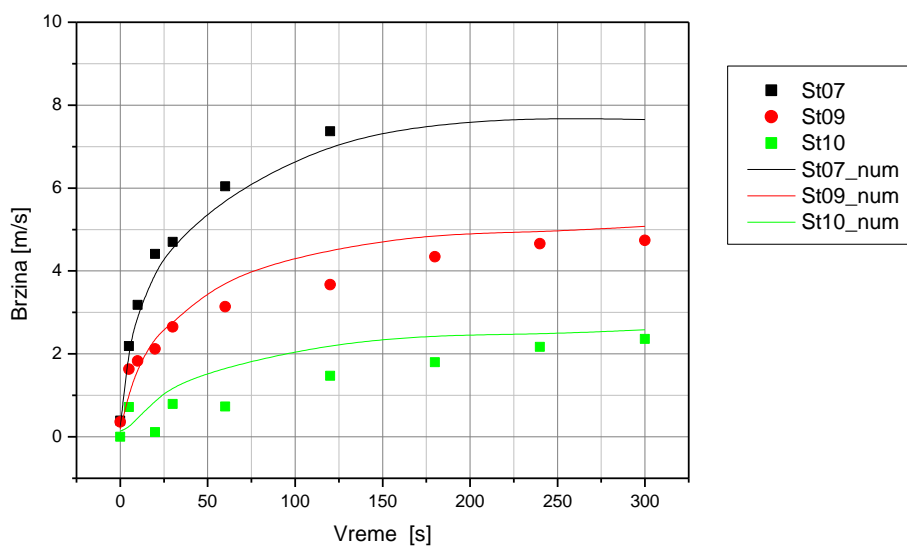


**Слика 11.2.4.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц

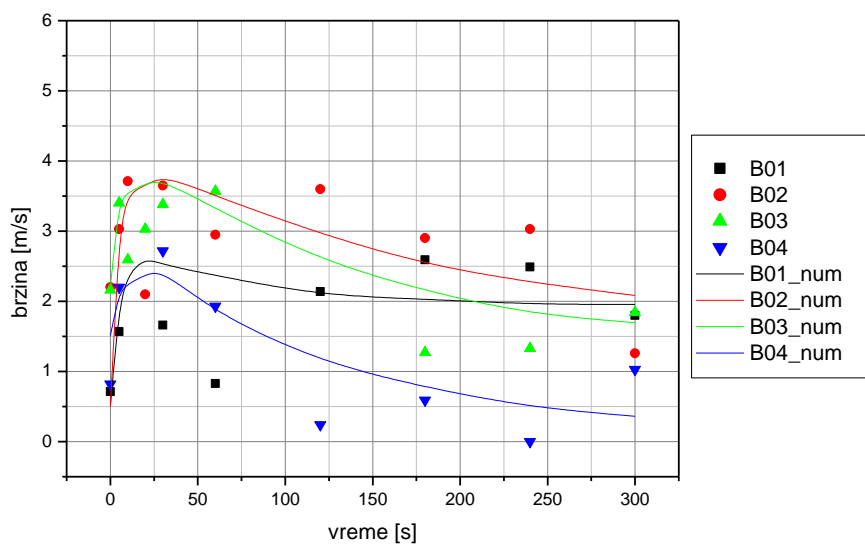
**Експеримент 2. (БВ08)**



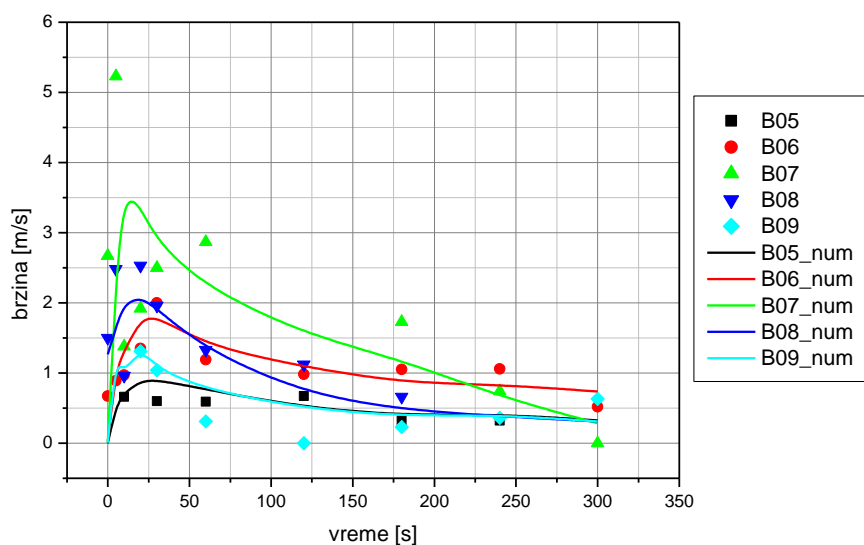
**Слика 11.2.5.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталнним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту А



**Слика 11.2.6.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

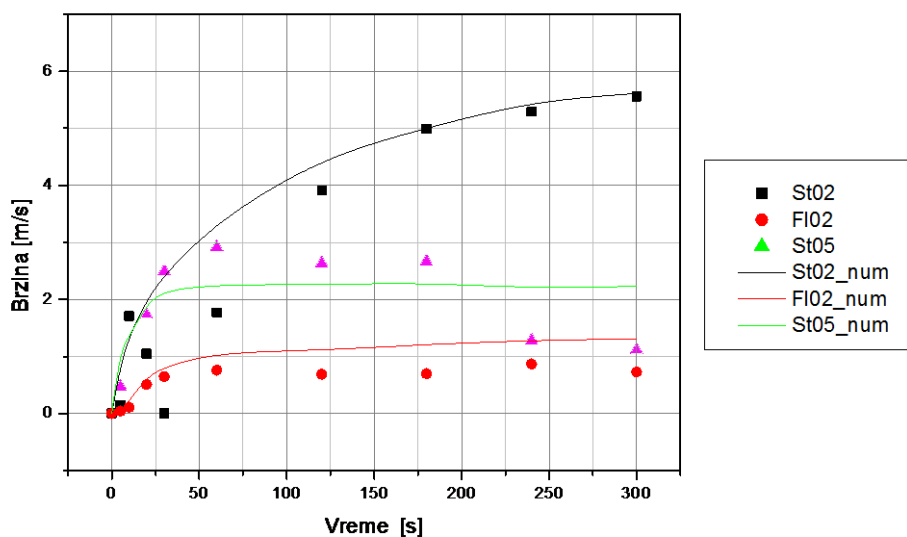


**Слика 11.2.7.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц



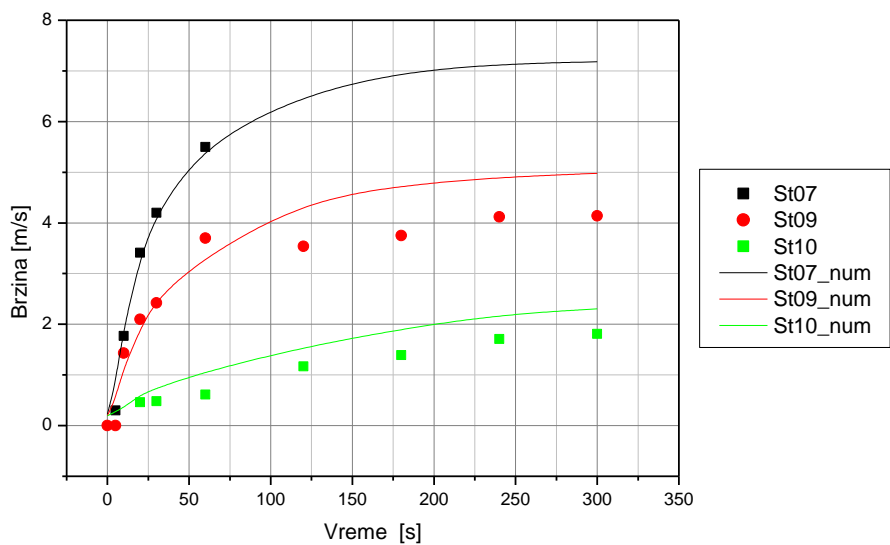
Слика 11.2.8. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц

### Експеримент 3. (БВ09)

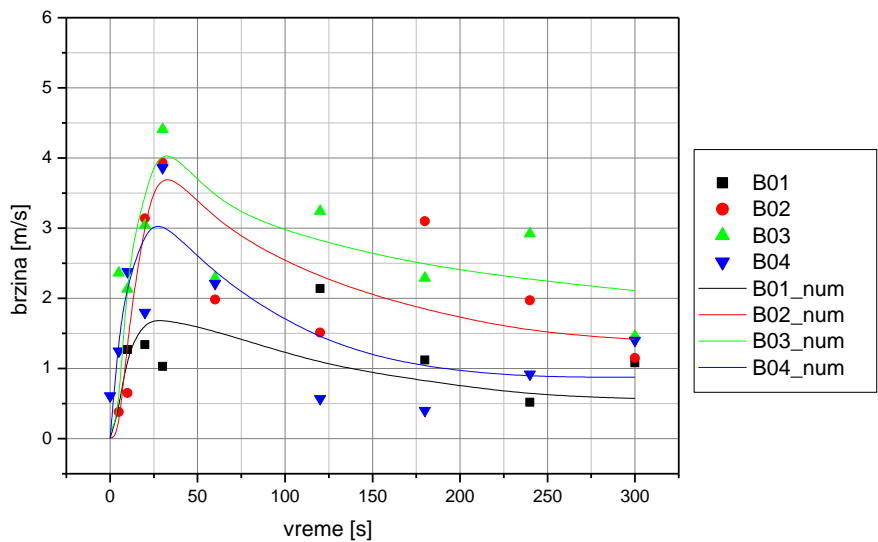


Слика 11.2.9. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту А

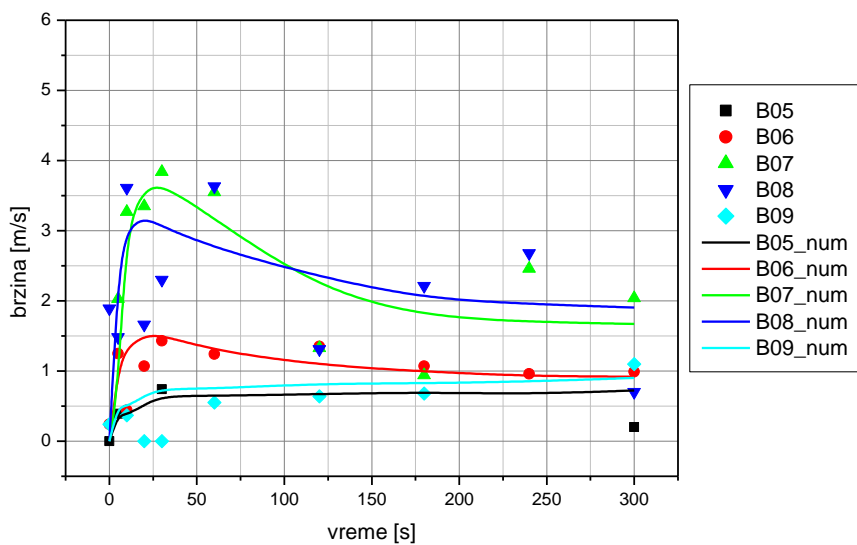




Слика 11.2.10. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту Б

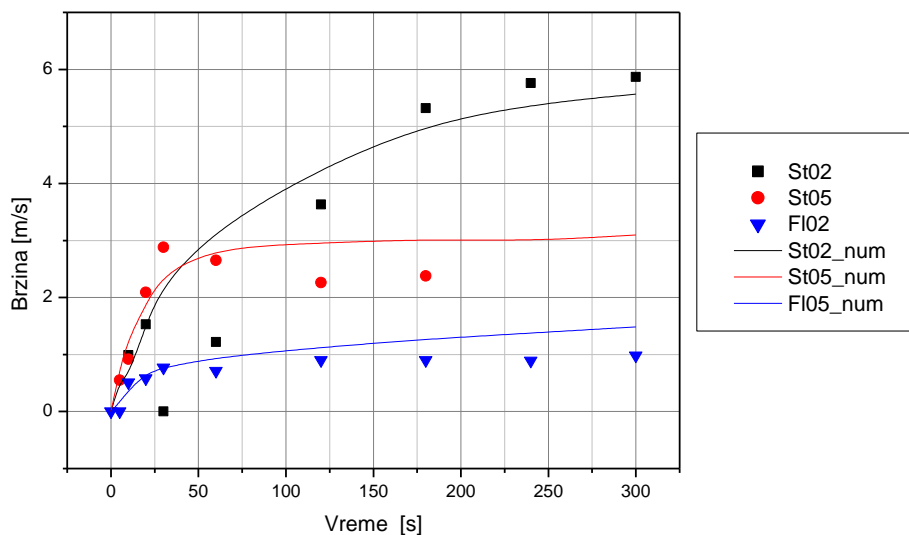


Слика 11.2.11. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц

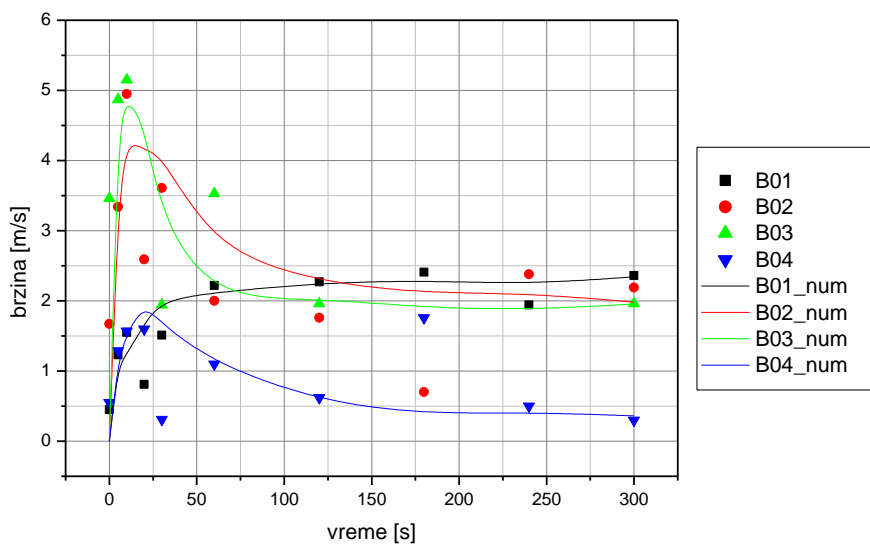


Слика 11.2.12. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц

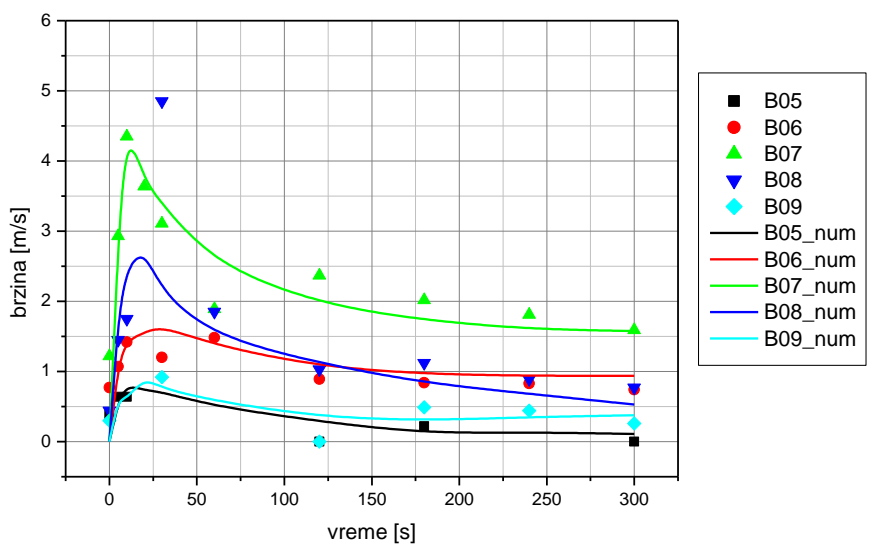
Експеримент 4. (БВ10)



Слика 11.2.13. Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерном месту А



**Слика 11.2.14.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц



**Слика 11.2.15.** Поређење брзина ваздуха добијених експиременталним и нумерички путем коришћењем модификованог модела ваздуха у оси тунела на мерној равни Ц

## Биографија

Барбара Видаковић је рођена 02.04.1973. године у Минхену, Немачка. У Београду је завршила основну школу и средњу Природно-математичку гимназију. Звање инжењера заштите од пожара стекла је на Вишој техничкој школи Универзитета у Новом Саду, а звање дипл. инжењера заштите од пожара стекла је на Катедри заштите од пожара Факултета за заштиту на раду, Универзитета у Нишу са оценом десет за дипломски рад: “Концептуално решење система заштите од пожара у Београдском драмском позоришту”.

Докторске студије је уписала школске 2005/06 године на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Од 2001. до 2004. године радила је у Националном удружењу инжењера и техничара за управљање ризицима у животној средини Србије (ДИТУР) чланом Европске и Светске конфедерације заштите од пожара (CFPA). Од 2004 до 2005. била је запослена у Ball Packaging Europe Belgrade, прво на пројекту изградње фабрике, а затим и у фабрици, у својству менаџера за заштиту од пожара, заштиту животне средине и заштиту на раду. Радни однос на Машинском факултету Универзитета у Београду започела је 2006. године у својству истраживач – сарадник, а затим исте године наставља да ради до 2008-е године у Иновационом центру Машинског факултета. Током тог периода држала је вежбе из предмета Основи заштите од пожара на Одсеку за процесну технику и заштиту животне средине.

Од 2008. године је у радном односу на Високој инжењерској школи струковних студија - “ТЕННИКУМ ТАУРУНУМ”, у Земуну, у звању наставника, на смеру Заштита од пожара и спасавање. Одржава наставу из стручних предмета: Основи тактике гашења пожара, Тактика гашења пожара и Техничко управљање ризицима у осигурању.

Током 2011, у периоду од 9 месеци, била ангажована као гостујући научник на Институту ВАМ - Bundesanstalt Für Materialforschung Und Prüfung у Берлину, Немачка, на пројекту ЦФД симулација пожара у тунелима.

Објавила је 10 научних и стручних радова, који су били саопштени на домаћим и међународним скуповима и симпозијумима, или објављени у домаћим и страним научним часописима. Такође је коаутор једног уџбеника.

Прилог 1.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани-а Барбара М. Видаковић  
број индекса D6/05

### Изјављујем

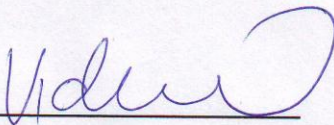
да је докторска дисертација под насловом

“ПОБОЉШАЊЕ CFD МОДЕЛА РАЗВОЈА ПОЖАРА У ТУНЕЛУ НА ОСНОВУ  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА”

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 08.10.2012.

  
\_\_\_\_\_



Прилог 2.

## ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНС ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора Барбара М. Видаковић  
Број индекса D6/05  
Студијски програм докторске студије  
Наслов рада "ПОБОЉШАЊЕ CFD МОДЕЛА РАЗВОЈА ПОЖАРА У ТУНЕЛУ  
НА ОСНОВУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА"  
Ментор Проф. др. Србислав Генић

Потписани/а Барбара М. Видаковић

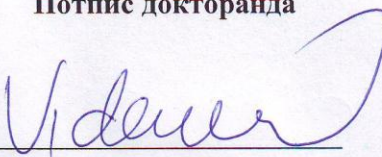
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 08.10.2012.





Прилог 3.

**ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ**

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Диј репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

“ПОБОЉШАЊЕ CFD МОДЕЛА РАЗВОЈА ПОЖАРА У ТУНЕЛУ НА ОСНОВУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА”

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

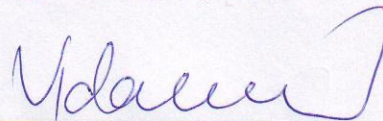
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 08.10.2012.



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.