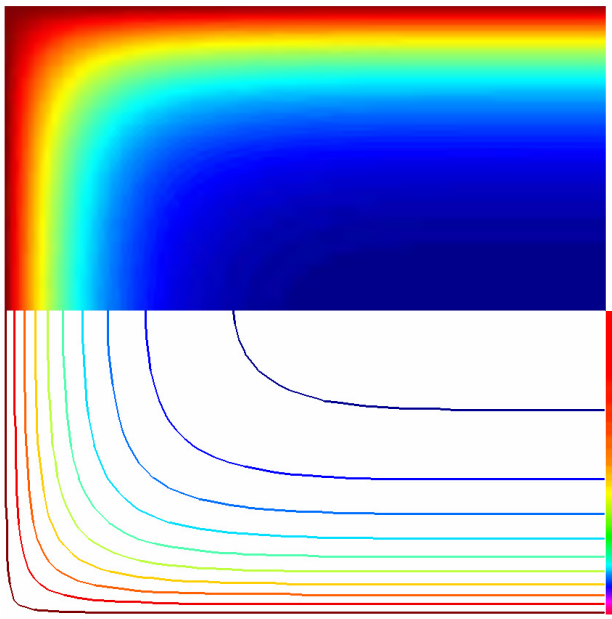
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Výpočetní program pro teplotní analýzu průřezů vystavených účinkům požáru

Uživatelská příručka

Radek Štefan, Jaroslav Procházka



TempAnalysis
Computer Program

version 1.0

Praha 2009

verze 1.0.b

TempAnalysis

Výpočetní program pro teplotní analýzu průřezů vystavených účinkům požáru

Uživatelská příručka
Verze 1.0.b

© Radek Štefan, Jaroslav Procházka, Praha 2009

Tato práce vznikla za podpory výzkumného záměru MSM 6840770001 Spolehlivost, optimalizace a trvanlivost stavebních materiálů a konstrukcí.

Citace této práce

Program

Štefan, R. – Procházka J. *TempAnalysis – Výpočetní program pro teplotní analýzu průřezů vystavených účinkům požáru* [software online]. Verze 1.0 (2009). Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí, 2009. Poslední aktualizace 20. 10. 2009.
URL <http://concrete.fsv.cvut.cz/~stefan/research.htm>.
<http://concrete.fsv.cvut.cz/~stefan/vyzkum.htm>.

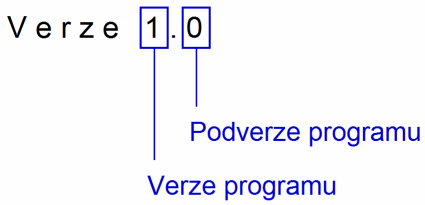
Uživatelská příručka

Štefan, R. – Procházka J. *TempAnalysis – Výpočetní program pro teplotní analýzu průřezů vystavených účinkům požáru. Uživatelská příručka* [online]. Verze 1.0.b (2009). Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí, 2009. Poslední aktualizace 30. 12. 2009.
URL <http://concrete.fsv.cvut.cz/~stefan/vyzkum.htm>.

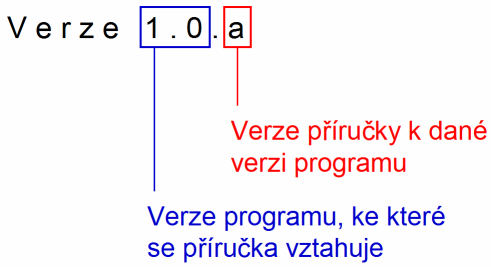
Komentáře a připomínky prosím zasílejte na e-mail: radek.stefan@fsv.cvut.cz

Způsob značení verzí programu a uživatelské příručky

Program



Uživatelská příručka



Aktuálně platné verze

Program	Verze 1.0	(20. 10. 2009)
Uživatelská příručka	Verze 1.0.b	(30. 12. 2009)

Změny ve verzích

Uživatelská příručka. Verze 1.0.b (30. 12. 2009).

Nově přidány strany 2–4. Drobné úpravy textu.

Obsah

1 Úvod 6

2 Instalace, spuštění programu 6

3 Zadání vstupních parametrů 8

3.1 Materiál 9

3.2 Rozměry průřezu 17

3.3 Izolační vrstva 17

3.4 Návrhový požární scénář 18

3.5 Vystavení požáru 19

3.6 Chybová hlášení, tlačítka CALCULATION, NEW a EXIT 19

4 Výpočet 21

5 Zobrazení výsledků výpočtu 24

5.1 Teplota v zadaném bodě 24

5.2 Grafické znázornění rozložení teploty v průřezu 26

5.3 Tlačítka PREPROCESSOR a EXIT 32

6 Ověření správnosti výpočtu teplot 32

7 Seznam použitých zdrojů 35

1 Úvod

Výpočetní program **TempAnalysis** slouží k teplotní analýze obdélníkových průřezů (desek, stěn, trámů, sloupů) vystavených účinkům požáru. Pomocí programu lze modelovat průřezy z libovolných materiálů, definovaných pomocí konstantních nebo teplotně závislých materiálových charakteristik, včetně průřezů opatřených izolační vrstvou. Teplotní zatížení je charakterizováno normovou nebo parametrickou teplotní křivkou podle normy ČSN EN 1991-1-2 [1]. Výstupem programu je grafické znázornění rozložení teploty v analyzovaném průřezu (teplotní profil, teplotní pole) a vyčíslení teplot v zadaných bodech průřezu. Výpočet je založen na metodě konečných prvků.

Program byl vytvořen v prostředí matematického nástroje **MATLAB R2007a** [3].

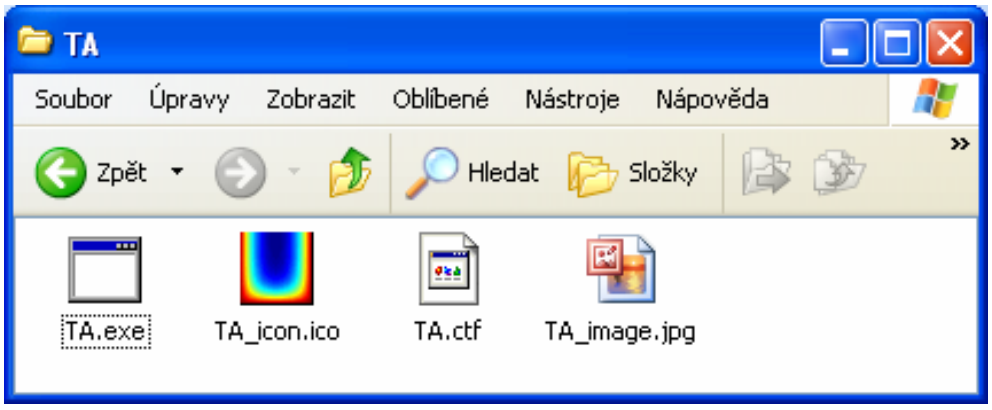
Uživatelské rozhraní programu je v anglickém jazyce.

2 Instalace, spuštění programu

Pro spuštění programu je nezbytné nejprve nainstalovat **MATLAB Component Runtime 7.6**. Instalace tohoto doplňku se provede pomocí aplikace **MCRInstaller.exe**.

Vlastní program **TempAnalysis** není nutné instalovat, ke spuštění slouží soubor **TA.exe** umístěný ve složce **TA**. V této složce musejí být společně se souborem **TA.exe** umístěny soubory **TA.ctf** a **TA_image.jpg** (viz **obr. 2.1**).

Pro jednoduché spouštění programu je vhodné vytvořit zástupce souboru **TA.exe** a umístit jej například na pracovní plochu počítače. Spouštění programu **TempAnalysis** poté lze provádět jednoduše pomocí tohoto zástupce (bez nutnosti otevírat složku **TA**), kterému je vhodné pro snazší orientaci přiřadit k tomuto účelu vytvořenou ikonu (soubor **TA_icon.ico** umístěný ve složce **TA**).



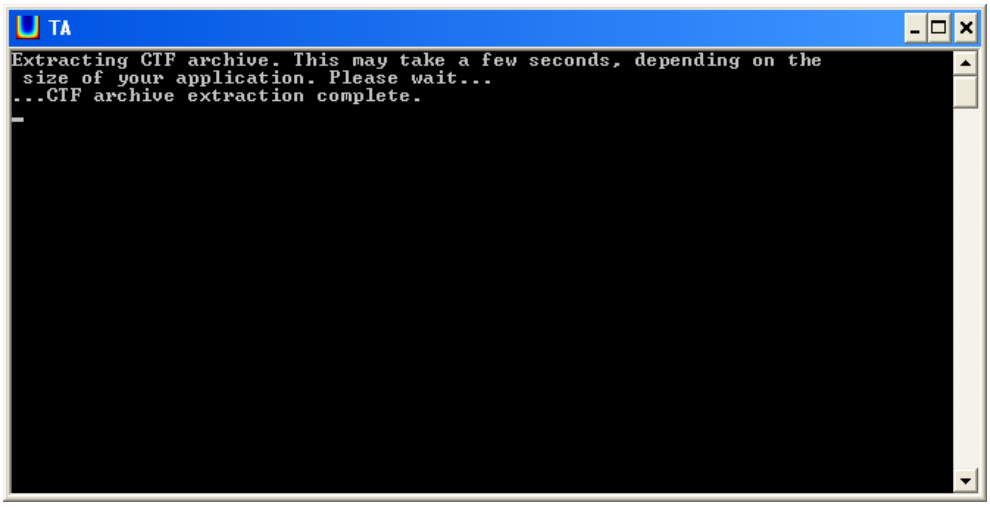
Obr. 2.1** Složka **TA

Po prvním spuštění programu (pomocí souboru **TA.exe** nebo jeho zástupce) se na několik vteřin objeví černé okno s textem (viz **obr. 2.2**):

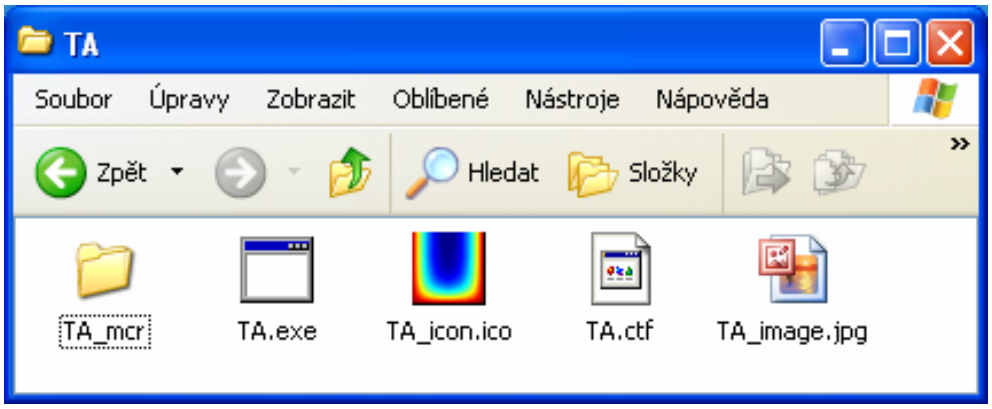
Extracting CTF archive. This may take a few seconds, depending on the size of your application. Please wait…

…CTF archive extraction complete.

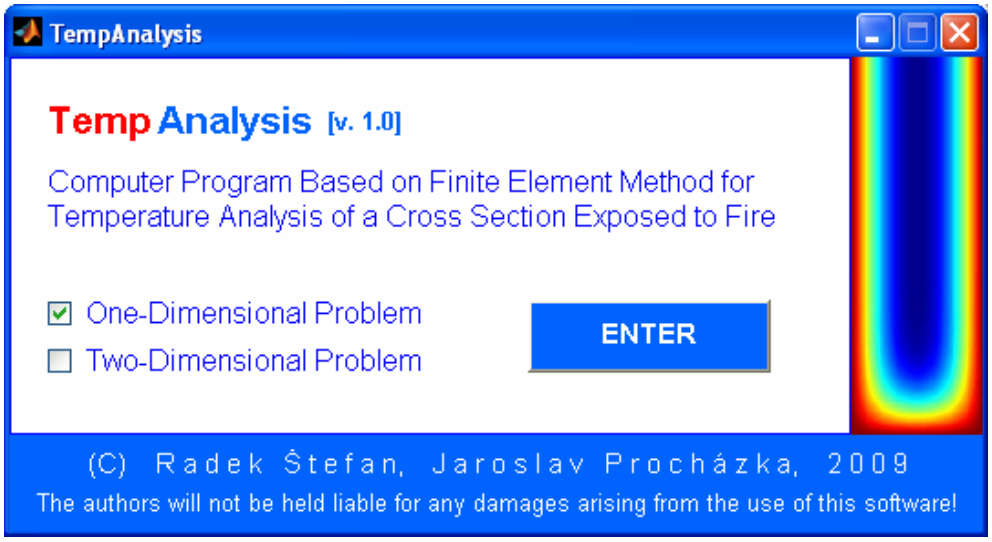
Poté se ve složce **TA** automaticky vytvoří nová složka **TA_mcr** (**obr. 2.3**) a spustí se úvodní okno programu **TempAnalysis** (**obr 2.4**). Při každém dalším spuštění programu (pokud uživatel nevymaže složku **TA_mcr**) již k extrahování CTF archivu nedochází (objeví se černé okno bez textu a poté dojde ke spuštění vlastního programu).



Obr. 2.2 *Okno s hlášením o extrahování CTF archivu*



Obr. 2.3 *Složka **TA** s nově vytvořenou složkou **TA_mcr***



Obr. 2.4 *Úvodní okno programu **TempAnalysis***

V úvodním okně programu (**obr. 2.4**) je třeba vybrat, zda uvažovat jednorozměrný problém (**One-Dimensional Problem**), představující desku či stěnu, nebo dvourozměrný problém (**Two-Dimensional Problem**), představující trám nebo sloup. Stisknutím tlačítka **ENTER** se zobrazí příslušné okno pro zadání vstupních parametrů (tzv. preprocesor, viz **obr. 3.1** a **obr. 3.2**).

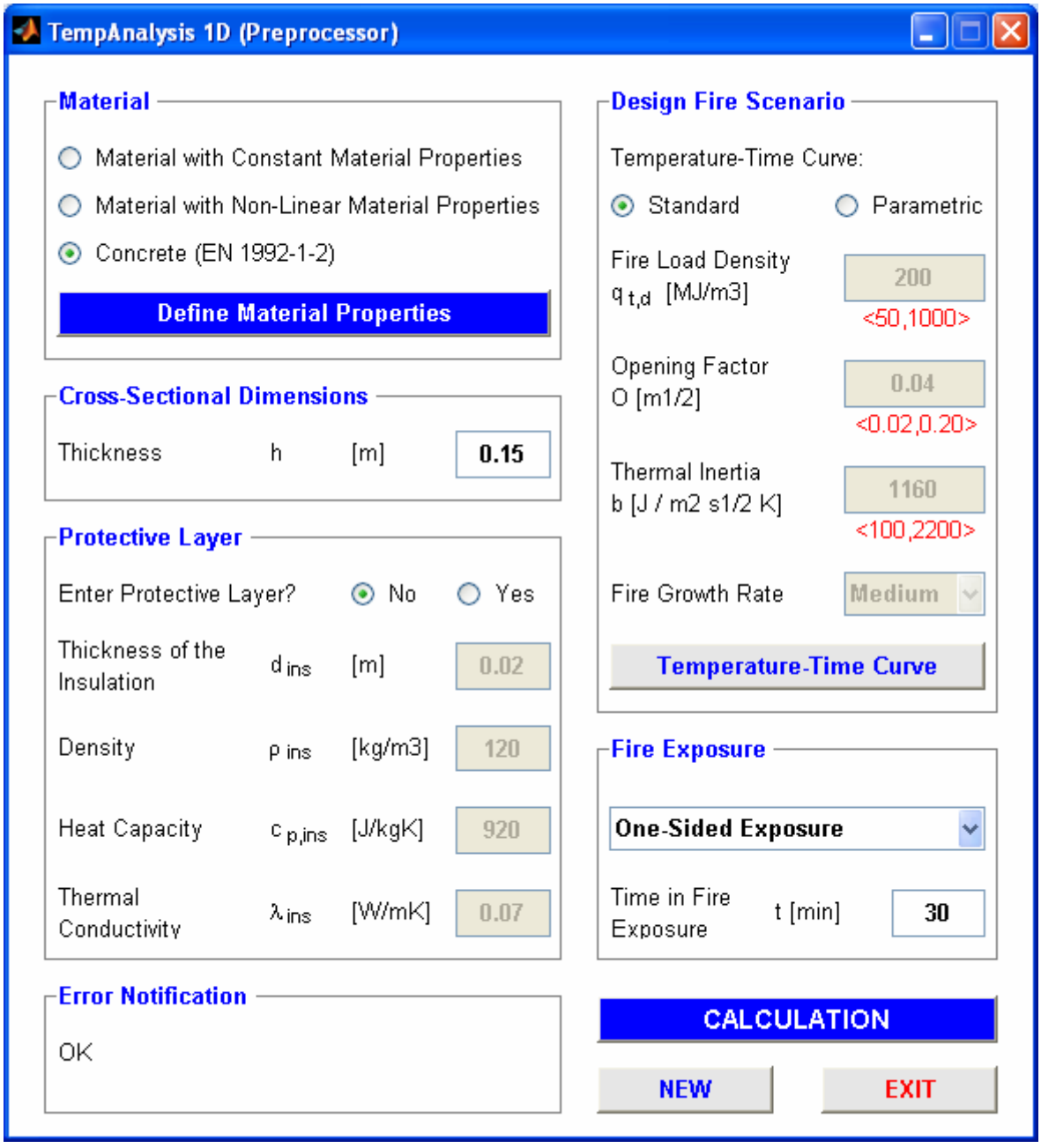
3 Zadání vstupních parametrů

Pro zadání vstupních parametrů výpočtu slouží dialogové okno **TempAnalysis 1D (Preprocessor)**, resp. **TempAnalysis 2D (Preprocessor)**, viz **obr. 3.1** a **obr. 3.2**.

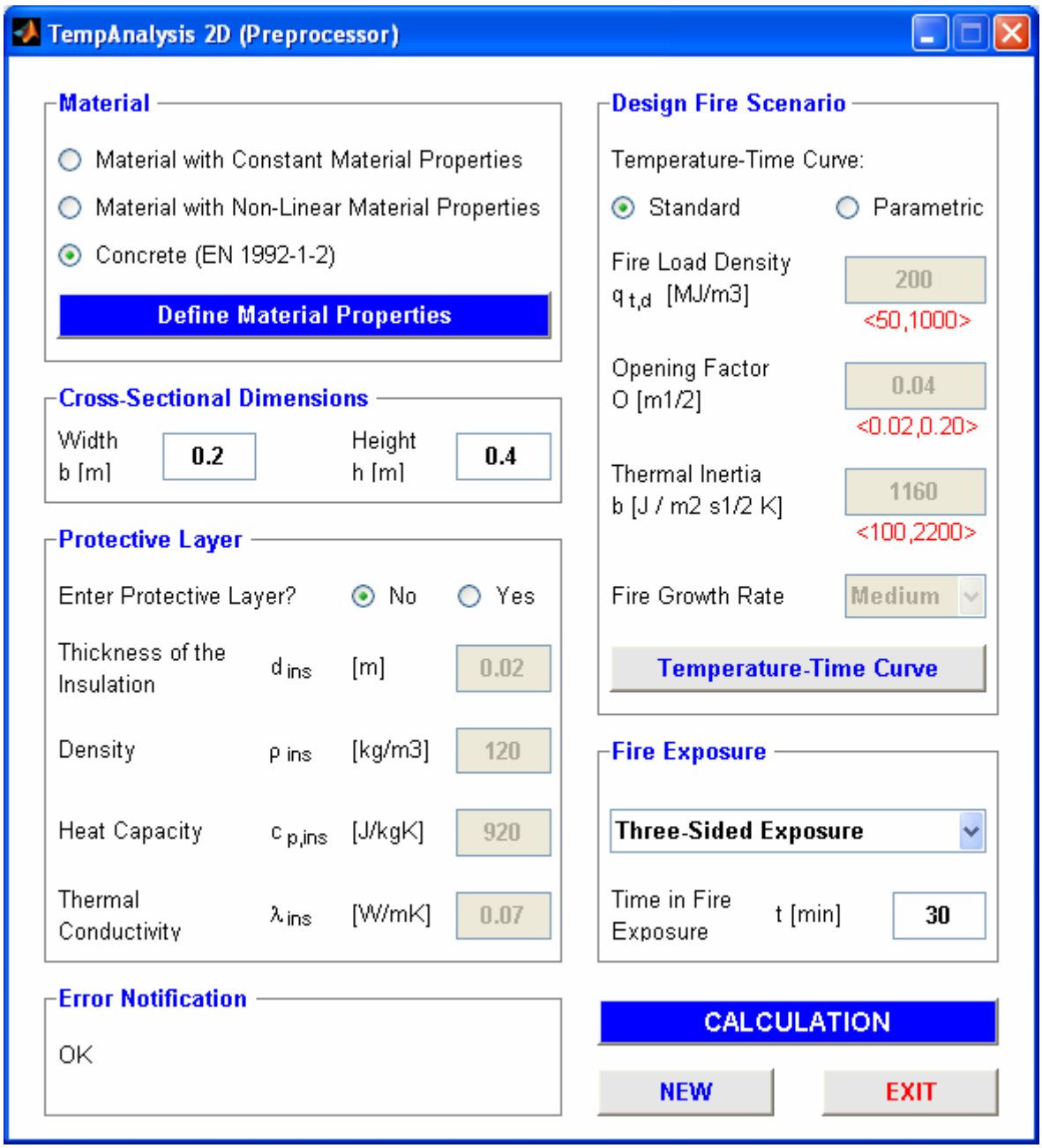
Okno se skládá z částí pro zadání:

- materiálu (**Material**),
- rozměrů průřezu (**Cross-Sectional Dimensions**),
- izolační vrstvy (**Protective Layer**),
- návrhového požárního scénáře (**Design Fire Scenario**),
- vystavení požáru (**Fire Exposure**).

Součástí okna je také řádek pro vypisování chybových hlášení (**Error Notification**).



Obr. 3.1 *Okno pro zadání vstupních parametrů výpočtu, jednorozměrný problém*



Obr. 3.2 *Okno pro zadání vstupních parametrů výpočtu, dvourozměrný problém*

3.1 Materiál

Program umožňuje zadání materiálu s konstantními materiálovými vlastnostmi (**Material with Constant Material Properties**), materiálu s nelineárními (teplotně závislými) materiálovými vlastnostmi (**Material with Non-Linear Material Properties**) nebo betonu (**Concrete**) podle normy ČSN EN 1992-1-2 [2].

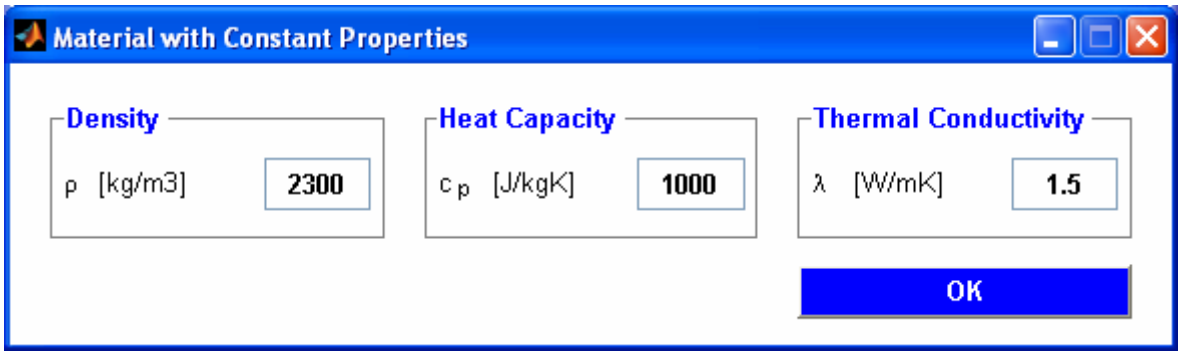
Stisknutím tlačítka **Define Material Properties** se zobrazí příslušné okno pro zadání jednotlivých materiálových vlastností (viz **obr. 3.3**, **obr. 3.7** a **obr. 3.12**).

Materiál s konstantními vlastnostmi

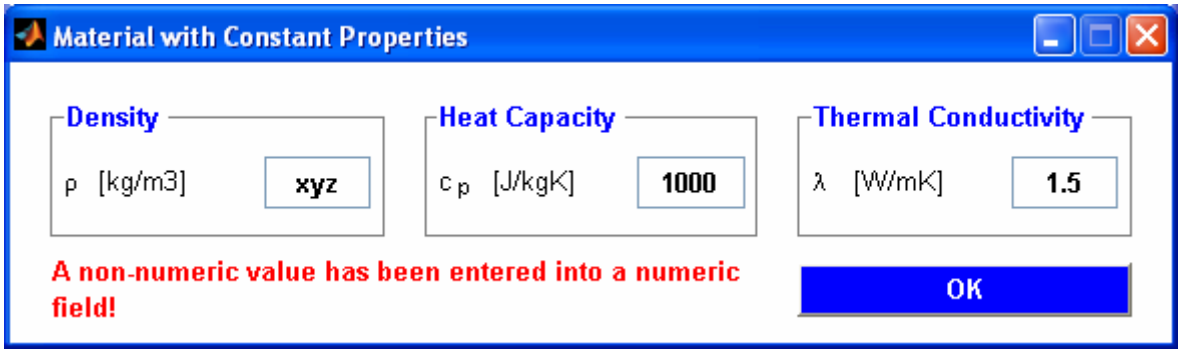
Materiál s konstantními vlastnostmi je definován konstantními hodnotami objemové hmotnosti ρ [kg·m^{-3}], měrné tepelné kapacity c_p [J·kg^{-1}·K^{-1}] a tepelné vodivosti λ [W·m^{-1}·K^{-1}] (viz **obr. 3.3**).

Načtení vlastností se provede stisknutím tlačítka **OK** (viz **obr. 3.3**).

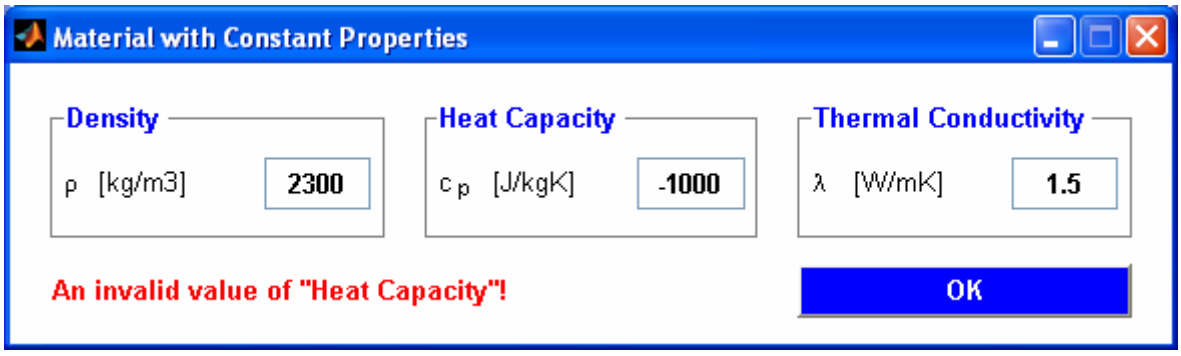
Pokud je některá z vlastností zadána chybně (místo číslice neplatný řetězec znaků, záporná hodnota nebo některé políčko prázdné), objeví se vedle tlačítka **OK** chybové hlášení. V tom případě nejsou vlastnosti načteny a příslušnou hodnotu je nutné opravit. Příklady chybových hlášení jsou na **obr. 3.4** a **obr. 3.5**.



Obr. 3.3 *Okno pro zadání konstantních materiálových vlastností*



Obr. 3.4 *Okno pro zadání konstantních materiálových vlastností, chybové hlášení z důvodu zadání neplatného řetězce znaků*



Obr. 3.5 *Okno pro zadání konstantních materiálových vlastností, chybové hlášení z důvodu zadání neplatné hodnoty (záporné číslo)*

Pokud jsou všechny hodnoty zadány správně, dojde po stisknutí tlačítka **OK** k zavření okna pro zadávání vlastností (okno **Material with Constant Properties**) a v hlavním okně preprocesoru (okno **TempAnalysis 1D (Preprocessor)**, resp. **TempAnalysis 2D (Preprocessor)**) se v části **Material** změní tlačítko **Define Material Properties** na tlačítko **Edit Properties** (viz **obr. 3.6**). V tomto okamžiku již nejde měnit vybraný druhu materiálu (např. materiál s konstantními vlastnostmi změnit na beton).

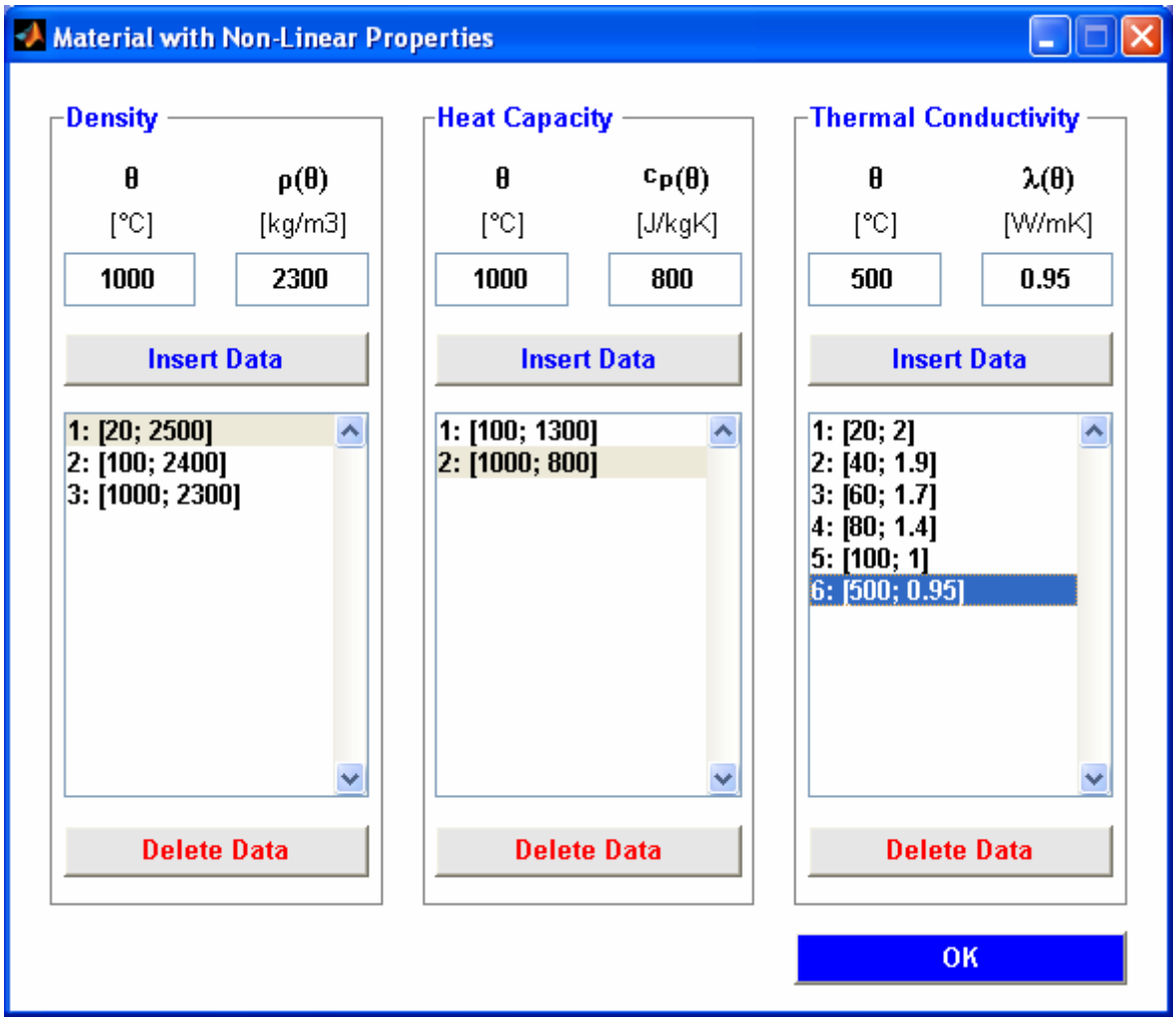
Tlačítko **Edit Properties** slouží k úpravě zadaných vlastností. Po stisknutí tohoto tlačítka se opět zobrazí okno **Material with Constant Properties** (**obr. 3.3**) s aktuálně zadanými vlastnostmi, které lze změnit jednoduše přepsáním v příslušném políčku a stisknutím tlačítka **OK**.

Obr. 3.6 *Část okna preprocesoru po úspěšném zadání materiálu s konstantními vlastnostmi, tlačítko* ***Edit Properties***

Materiál s nelineárními vlastnostmi

Materiál s nelineárními vlastnostmi je definován teplotně závislými hodnotami objemové hmotnosti $\rho(\theta)$ [kg·m^{-3}], měrné tepelné kapacity $c_p(\theta)$ [J·kg^{-1}·K^{-1}] a tepelné vodivosti $\lambda(\theta)$ [W·m^{-1}·K^{-1}] (viz **obr. 3.7**).

Zadání se provádí bodově, pomocí uspořádaných dvojic, kde na prvním místě je teplota materiálu a na druhém příslušná hodnota materiálové vlastnosti. Pro každou vlastnost musejí být zadány minimálně 2 dvojice hodnot (minimálně 2 body určující graf závislosti dané vlastnosti na teplotě).



Obr. 3.7 *Okno pro zadání nelineárních materiálových vlastností*

Vkládání jednotlivých bodů se provádí zapsáním příslušných hodnot (teploty a na ní závislé materiálové vlastnosti) do k tomu určených políček a stisknutím tlačítka **Insert Data**.

Tlačítko **Delete Data** slouží pro odebrání označeného řádku ze seznamu definovaných bodů.

Vzhledem k tomu, že teplota materiálu při požáru se může pohybovat v rozmezí od 20 °C do přibližně 1300 °C, nemá smysl definovat závislost materiálových vlastností na teplotě mimo tento interval. Program sice zadané hodnoty ležící vně tohoto rozmezí načte, při výpočtu je však nevyužije.

Pokud je závislost některé z vlastností definována pouze pro určité rozmezí teplot, program předpokládá, že pro ostatní teploty jsou hodnoty dané vlastnosti shodné jako pro první, resp. poslední definovaný bod (viz **obr. 3.11**).

Načtení vlastností se provede stisknutím tlačítka **OK** (viz **obr. 3.7**). Stejně jako v případě materiálu s konstantními vlastnostmi je případné chybné zadání oznámeno chybovým hlášením (viz výše).

Pokud jsou všechny hodnoty zadány správně, dojde po stisknutí tlačítka **OK** k zavření okna pro zadávání vlastností (okno **Material with Non-Linear Properties**) a v hlavním okně preprocesoru (okno **TempAnalysis 1D (Preprocessor)**, resp. **TempAnalysis 2D (Preprocessor)**) se v části **Material** změní tlačítko **Define Material Properties** na tlačítka **Edit Properties** a **Graphs of Properties** (viz **obr. 3.8**). V tomto okamžiku již nejde měnit vybraný druhu materiálu.

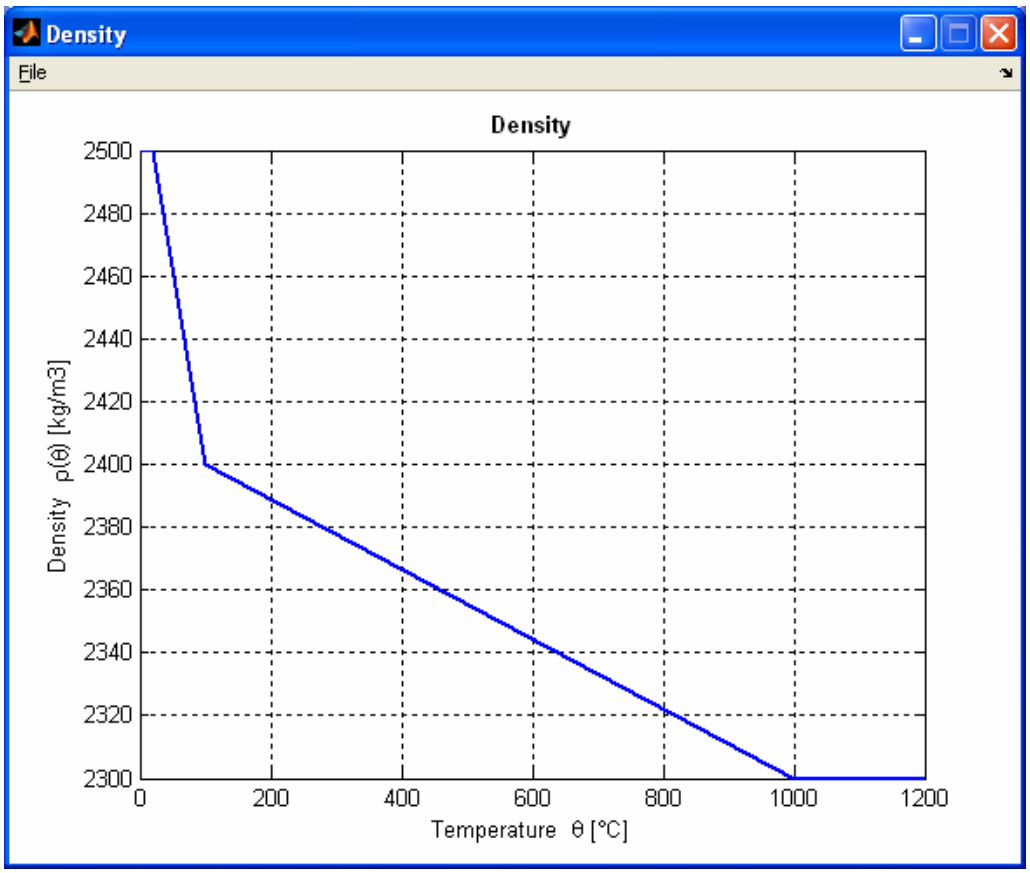
Obr. 3.8 *Část okna preprocesoru po úspěšném zadání materiálu s nelineárními vlastnostmi, tlačítka* ***Edit Properties*** *a* ***Graphs of Properties***

Tlačítko **Edit Properties** slouží k úpravě zadaných vlastností. Po stisknutí tohoto tlačítka se opět zobrazí okno **Material with Non-Linear Properties** (**obr. 3.7**) s aktuálně zadanými vlastnostmi, které lze změnit přidáním či odebráním některých bodů a stisknutím tlačítka **OK**.

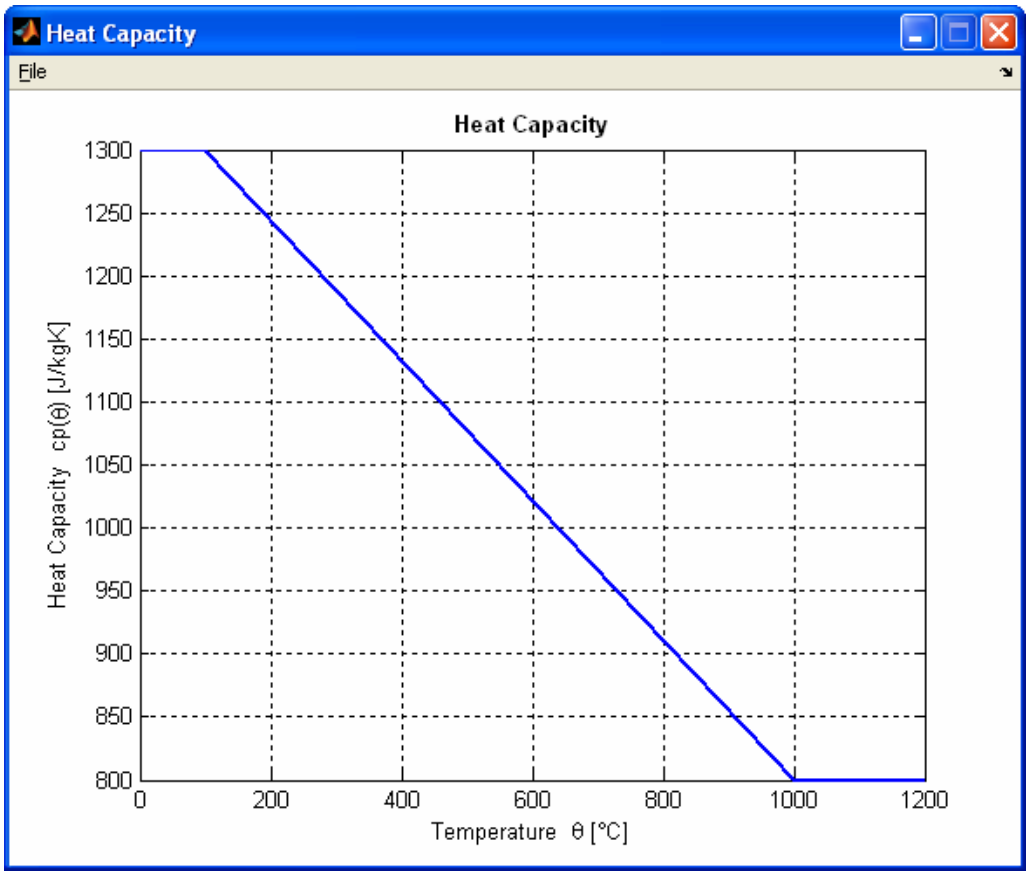
Použitím tlačítka **Graphs of Properties** se zobrazí nové okno (**Graphs of Material Properties**) obsahující rolovací menu s jednotlivými vlastnostmi. Graf vybrané vlastnosti se vykreslí po stisknutí tlačítka **OK** (viz **obr. 3.9**).

Příklady grafů jsou uvedeny na **obr. 3.10** a **obr. 3.11**.

Obr. 3.9 *Okno pro výběr materiálové vlastnosti, jejíž graf má být vykreslen*



Obr. 3.10 *Graf závislosti objemové hmotnosti na teplotě (odpovídá zadání na* ***obr. 3.7****)*



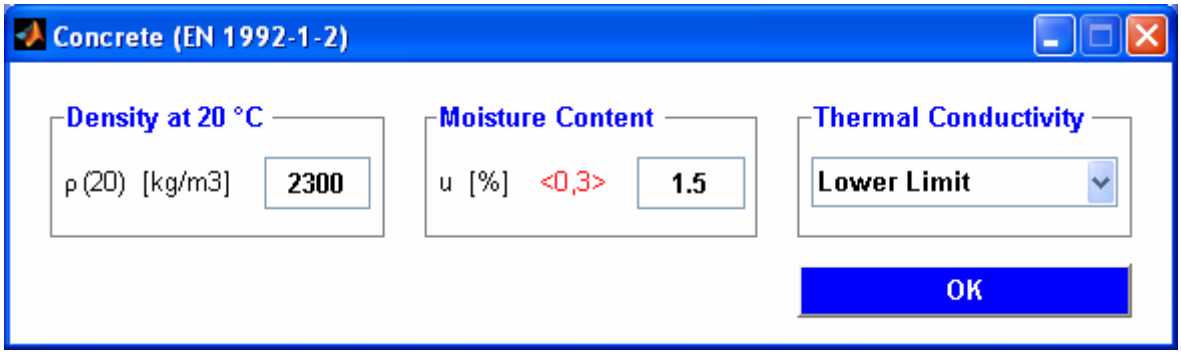
Obr. 3.11 *Graf závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě (odpovídá zadání na* ***obr. 3.7****)*

Beton

Vlastnosti betonu jsou uvažovány podle normy ČSN EN 1992-1-2 [2]. Beton je definován hodnotami objemové hmotnosti při 20 °C $\rho(20)$ [kg·m^{-3}] a vlhkosti u [% hm. betonu] (musí být zadána hodnota v rozmezí 0–3 %) a dále úrovní tepelné vodivosti.

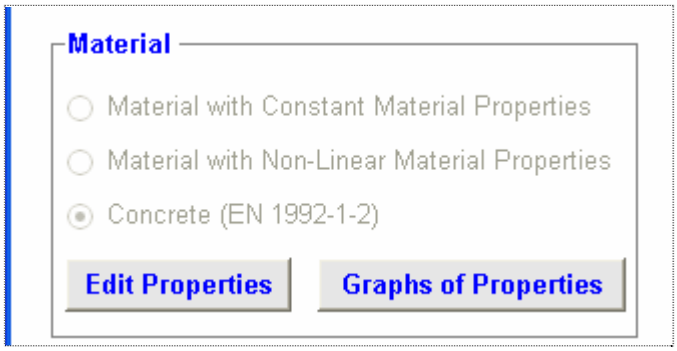
Tepelná vodivost betonu λ_c [W·m^{-1}·K^{-1}] má být podle normy ČSN EN 1992-1-2 [2] uvažována v rozmezí dolní (**Lower Limit**) a horní (**Upper Limit**) meze (definice těchto mezí viz norma [2]), přičemž tato norma uvádí, že dolní mez dává pro betonové konstrukce realističtější teploty než mez horní, která byla odvozena ze zkoušek ocelobetonových spřažených konstrukcí. Použití horní meze však vede ke konzervativnějším výsledkům (vyšší teploty betonu).

Vztahy vyjadřující závislost objemové hmotnosti na teplotě a závislost měrné tepelné kapacity na teplotě a vlhkosti betonu jsou uvedeny v normě [2].



Obr. 3.12 *Okno pro zadání vlastností betonu*

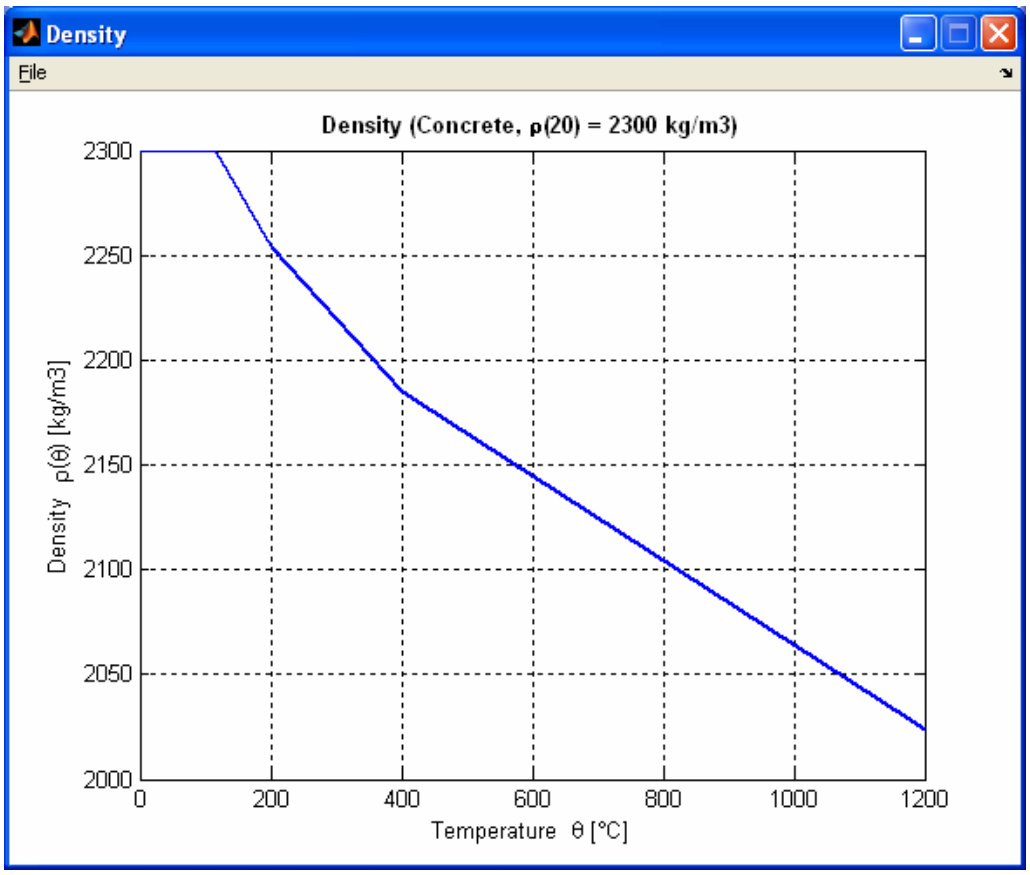
Pokud jsou všechny hodnoty zadány správně, dojde po stisknutí tlačítka **OK** k zavření okna pro zadávání vlastností (okno **Concrete (EN 1992-1-2)**) a v hlavním okně preprocesoru (okno **TempAnalysis 1D (Preprocessor)**, resp. **TempAnalysis 2D (Preprocessor)**) se v části **Material** změní tlačítko **Define Material Properties** na tlačítka **Edit Properties** a **Graphs of Properties** (viz **obr. 3.13**). V tomto okamžiku již nejde měnit vybraný druhu materiálu.



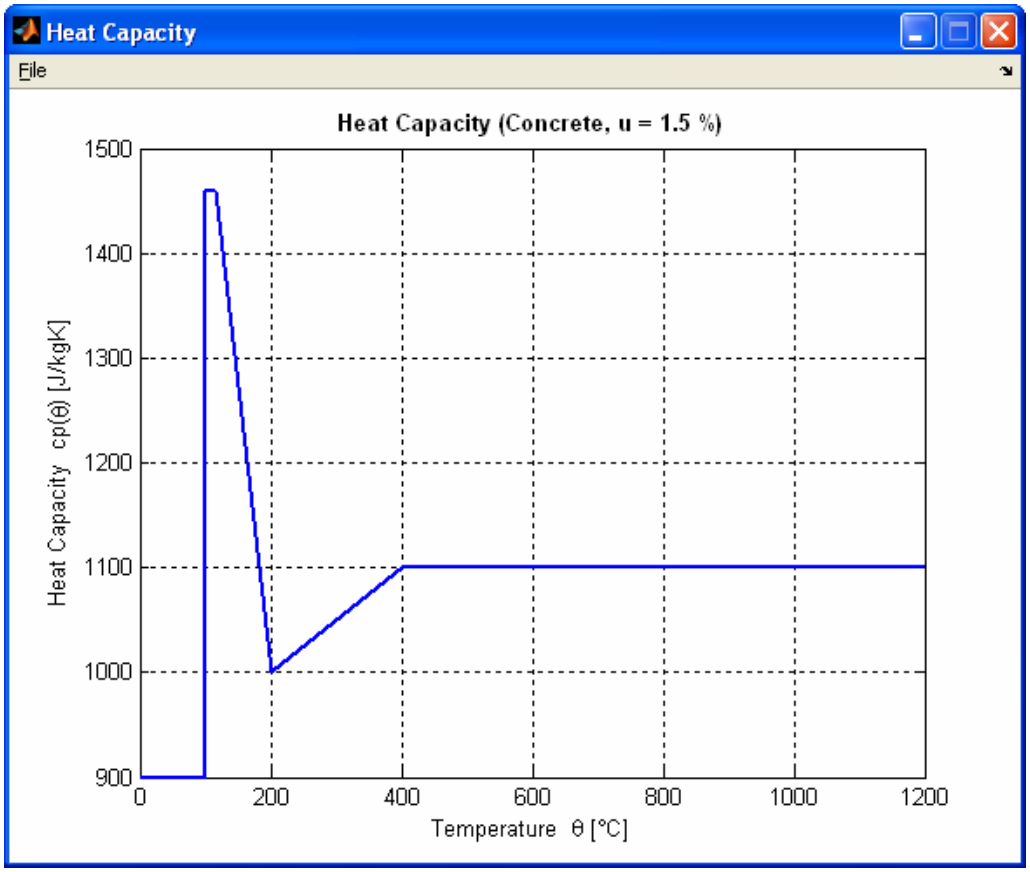
Obr. 3.13 *Část okna preprocesoru po úspěšném zadání vlastností betonu, tlačítka* ***Edit Properties*** a **Graphs of Properties**

Funkce tlačítek **Edit Properties** a **Graphs of Properties** je shodná jako v předchozích případech (materiál s konstantními, resp. nelineárními vlastnostmi).

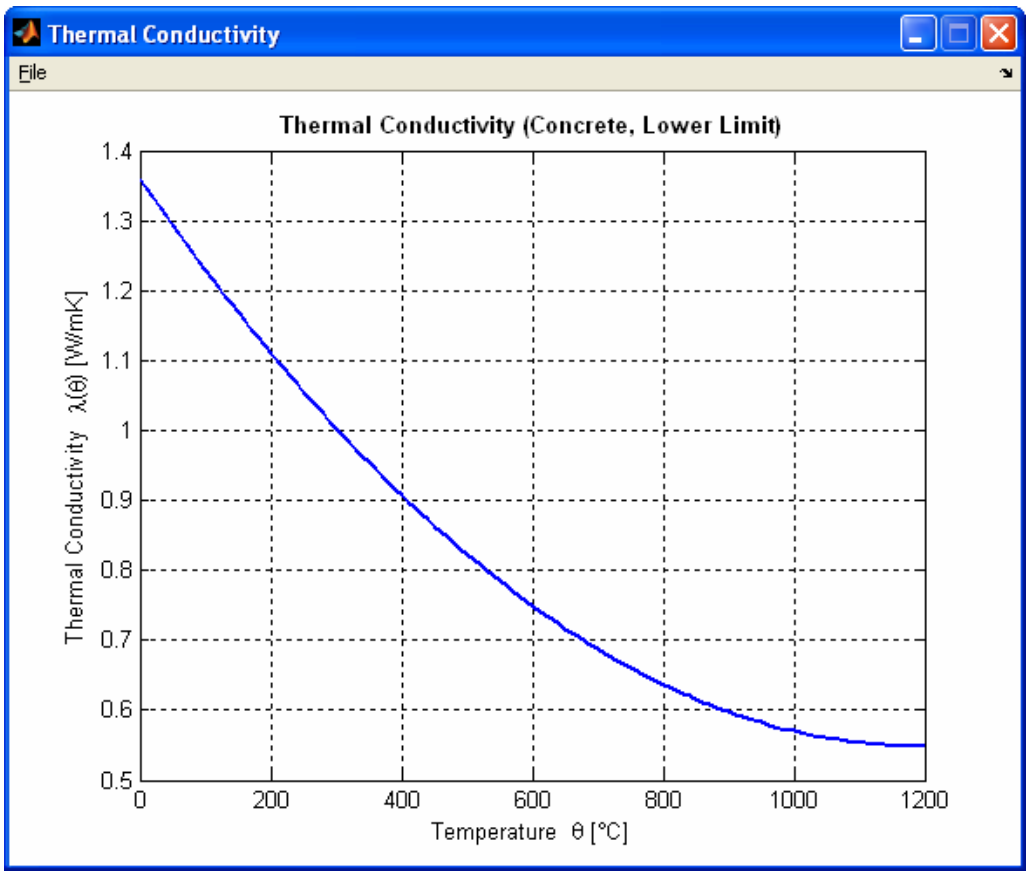
Na **obr. 3.14–3.17** jsou uvedeny příklady grafů vyjadřujících závislost vlastností betonu na teplotě.



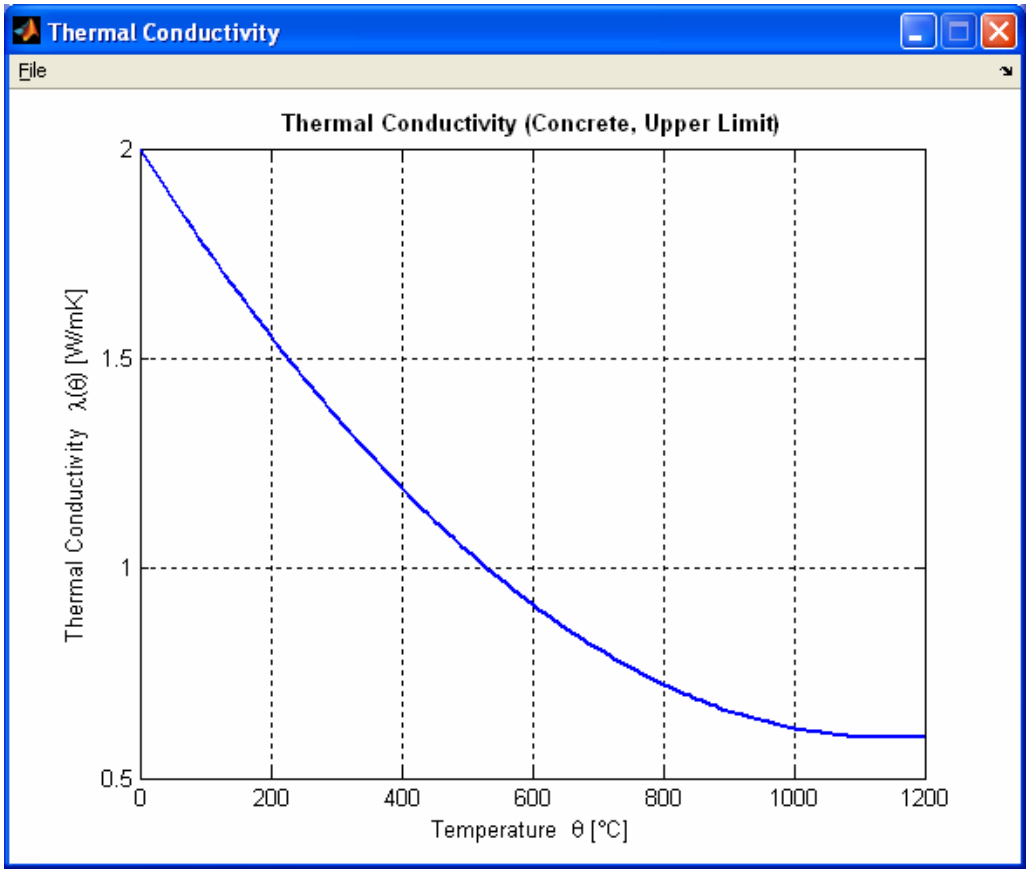
Obr. 3.14 *Graf závislosti objemové hmotnosti betonu na teplotě při počáteční objemové hmotnosti betonu* $\rho(20) = 2300\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$



Obr. 3.15 *Graf závislosti měrné tepelné kapacity betonu na teplotě při vlhkosti betonu u = 1,5 %*



Obr. 3.16 *Graf závislosti tepelné vodivosti betonu na teplotě, dolní mez*



Obr. 3.17 *Graf závislosti tepelné vodivosti betonu na teplotě, horní mez*

Při výpočtu rozložení teploty v průřez je kromě výše popsaných vlastností nutné znát ještě jednu materiálovou charakteristiku, a sice povrchovou emisivitu prvku ε_m [-].

Pro beton je v programu **TempAnalysis** v souladu s normou [2] nastavena hodnota $\varepsilon_m = 0{,}7$.

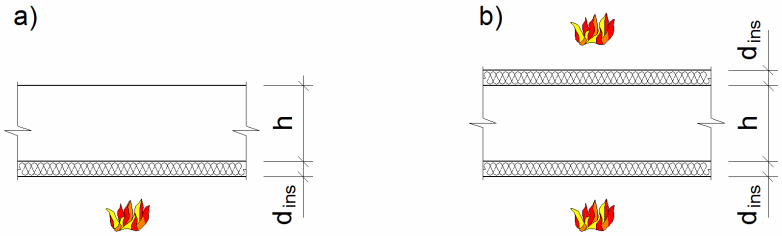
Pro ostatní materiály a pro všechny průřezy (včetně betonových) opatřené izolační vrstvou je uvažována hodnota $\varepsilon_m = 0{,}8$ (univerzální hodnota podle normy [1]).

3.2 Rozměry průřezu

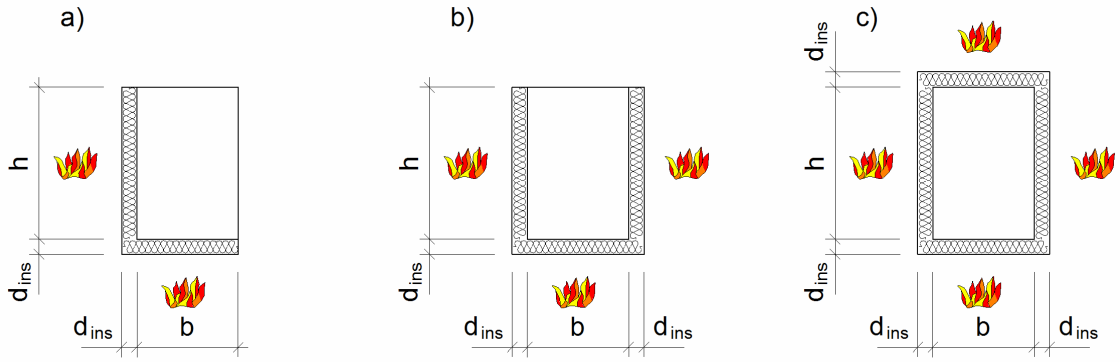
V případě jednorozměrného problému (deska, stěna) je rozměr průřezu definován tloušťkou *h* [m] (viz **obr. 3.1** a **obr. 3.18**).

Velikost obdélníkového průřezu je určena šířkou *b* [m] a výškou *h* [m] (viz **obr. 3.2** a **obr. 3.19**).

Hodnoty *b* a *h* vyjadřují rozměry vlastního průřezu ze zadaného materiálu, tzn. bez případné izolační vrstvy (viz **obr. 3.18** a **obr. 3.19**).



Obr. 3.18 *Označení rozměrů průřezu, jednorozměrný problém*
a) průřez vystavený požáru z jedné strany, b) průřez vystavený požáru ze dvou stran



Obr. 3.19 *Označení rozměrů průřezu, dvourozměrný problém*
a) průřez vystavený požáru ze dvou stran, b) průřez vystavený požáru ze tří stran, c) průřez vystavený požáru ze čtyř stran,

3.3 Izolační vrstva

Na stranách průřezu vystavených požáru lze uvažovat protipožární ochrannou vrstvu (viz **obr. 3.18** a **obr. 3.19**). V části **Protective Layer** preprocesorového okna (viz **obr. 3.1** a **obr. 3.2**) je třeba zaškrtnout jednu ze dvou možností: **No** (pokud nemá být izolace uvažována) nebo **Yes** (pro zadání izolace).

Pokud má být izolace uvažována, zadají se následující parametry: tloušťka izolační vrstvy d_{ins} [m], objemová hmotnost izolace ρ_{ins} [kg·m^{-3}], měrná tepelná kapacita izolace $c_{p,ins}$ [J·kg^{-1}·K^{-1}] a koeficient tepelné vodivosti izolace λ_{ins} [W·m^{-1}·K^{-1}].

Parametry ρ_{ins}, $c_{p,ins}$ a λ_{ins} se při výpočtu uvažují konstantní. Příslušné hodnoty lze nalézt např. u výrobců izolačních materiálů nebo v odborné literatuře (např. [4]).

Izolace se uvažuje pouze na stranách vystavených požáru!

3.4 Návrhový požární scénář

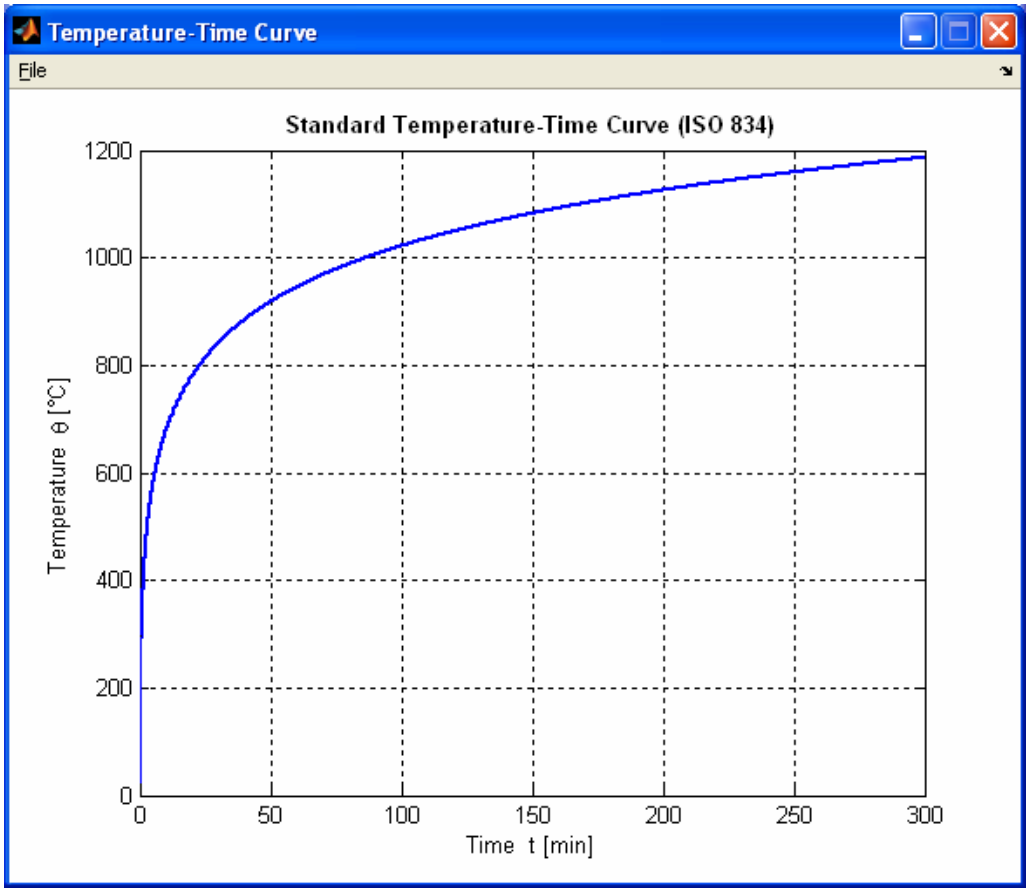
Pro modelování vývoje teploty plynů v požárním úseku lze použít normovou teplotní křivku (křivka ISO 834, viz článek 3.2.1 normy [1]) nebo parametrickou teplotní křivku (viz příloha A normy [1]).

V případě normové teplotní křivky stačí zaškrtnout příslušné tlačítko (**Standard**) v části **Design Fire Scenario** preprocesorového okna a žádné další údaje již není třeba vyplňovat.

Při výběru parametrické teplotní křivky (tlačítko **Parametric**) se zadají následující údaje:

- návrhová hodnota hustoty požárního zatížení $q_{t,d}$ [MJ·m^{-2}] (vztažená k celé ploše povrchu ohraničujících konstrukcí požárního úseku A_t [m^2]), postup stanovení hodnoty $q_{t,d}$ viz příloha E normy [1] (musí platit $50 \le q_{t,d} \le 1000$),
- koeficient otvorů O [-], viz příloha A normy [1] (musí platit $0{,}02 \le O \le 0{,}2$),
- koeficient povrchů b [J·m^{-2}·s$^{-1/2}$·K^{-1}], viz příloha A normy [1] (musí platit $100 \le b \le 2200$),
- rychlost rozvoje požáru, viz příloha E normy [1].

Zadaný model požáru je možné zobrazit stisknutím tlačítka **Temperature Time Curve** (viz **obr. 3.1** a **obr. 3.2**). V případě normového požáru se zobrazí okno uvedené na **obr. 3.20**.

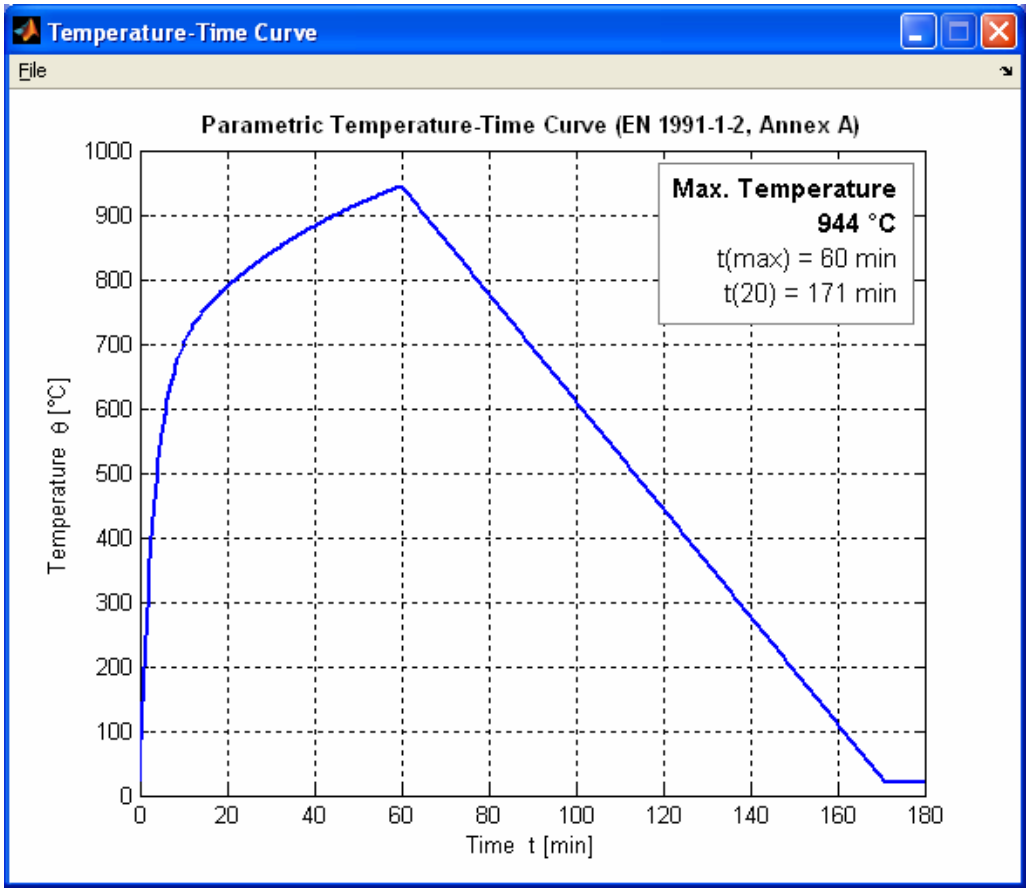


Obr. 3.20 *Okno s vykreslenou normovou teplotní křivkou*

V případě parametrického požáru záleží výsledná podoba teplotní křivky na zadaných parametrech. Na **obr. 3.21** je zobrazeno okno s parametrickou teplotní křivkou při uvažování: $q_{t,d}$ = 200 MJ·m^{-2}, O = 0,04, b = 1160 J·m^{-2}·s$^{-1/2}$·K^{-1} a rychlost rozvoje požáru – střední (přednastavené hodnoty).

Součástí okna s parametrickou teplotní křivkou je také informace o maximální dosažené teplotě (**Max. Temperature**), příslušném čase *t*(max) a čase *t*(20), ve kterém je ukončena fáze chladnutí a teplota plynů je opět (stejně jako před požárem) rovna 20 °C.

Vykreslování parametrické teplotní křivky je nastaveno tak, aby byla vždy zobrazena včetně celé fáze chladnutí (tzn. že čas na ose x je v intervalu 0 až *t*(20) – zaokrouhleno nahoru na celé hodiny).



Obr. 3.21 *Okno s vykreslenou parametrickou teplotní křivkou*

3.5 Vystavení požáru

V části **Fire Exposure** preprocesorového okna (viz **obr. 3.1** a **obr. 3.2**) se vybere, zda požár působí z jedné nebo ze dvou stran průřezu (jednorozměrný problém – desky, stěny), resp. ze dvou, tří nebo čtyř stran (dvourozměrný problém – trámy, sloupy), viz **obr. 3.18** a **obr. 3.19**, a zadá se doba působení požáru *t* [min].

3.6 Chybová hlášení, tlačítka CALCULATION, NEW a EXIT

Stisknutím tlačítka **CALCULATION** se v případě, že byly všechny parametry zadány správně, spustí výpočet teplot (viz **kapitola 4**).

Chybné zadání je oznámeno v řádku pro výpis chybových hlášení (**Error Notification**).

Chybová hlášení

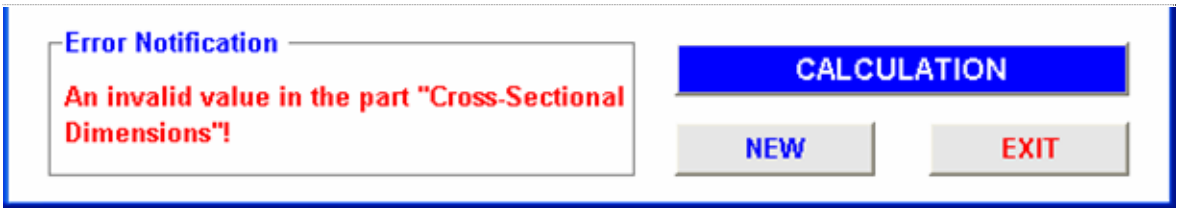
Chybová hlášení lze rozdělit do tří skupin.

První skupinu tvoří upozornění uvedené na **obr. 3.22**, které se objeví vždy, když v některém z polí pro zadávání parametrů není číslo, ale jakýkoli neplatný řetězec znaků (písmena, čísla + písmena, symboly apod.), případně pokud je některé z polí prázdné.

Z hlediska správného zápisu čísel není rozhodující, zda uživatel použije desetinnou čárku nebo desetinnou tečku. Program akceptuje obě možnosti.

Obr. 3.22 *Hlášení o zadání neplatného řetězce znaků nebo nevyplnění některého pole*

Druhou skupinu tvoří hlášení, která se objeví v případě, že pro zadání parametrů sice byla použita čísla, ale zadaná hodnota neodpovídá požadovaným mezím. U některých parametrů jsou meze zvýrazněny přímo pod zadávacím polem (např. pro **Fire Load Density** uvedena mez <50, 1000>, viz např. **obr. 3.1**), u ostatních parametrů jsou meze logicky zřejmé (např. tloušťka desky musí splňovat $h > 0$). Příklad hlášení spadajících do této skupiny viz **obr. 3.23–3.26**.



Obr. 3.23 *Hlášení o chybně zadaných rozměrech průřezu*

Obr. 3.24 *Hlášení o chybně zadaných parametrech izolační vrstvy*

Obr. 3.25 *Hlášení o chybně zadaných parametrech požáru*

Obr. 3.26 *Hlášení o chybně zadané době vystavení požáru*

Třetí skupinu tvoří upozornění uvedené na **obr. 3.27**, které se objeví v případě, že nebyly definovány vlastnosti materiálu průřezu.

***Obr. 3.27** Hlášení upozorňující na to, ze nabyly zadány materiálové vlastnosti*

Tlačítka NEW a EXIT

V pravém dolním rohu okna preprocesoru programu **TempAnalysis** jsou umístěna tlačítka **NEW** a **EXIT**.

Tlačítko **NEW** slouží k novému spuštění programu. Po stisknutí tohoto tlačítka se uzavřou všechna aktivní okna a spustí se úvodní okno programu (**obr. 2.4**).

Tlačítko **EXIT** uzavře všechna aktivní okna a ukončí práci v programu. Tím se liší od tlačítka ☒, které slouží k uzavření pouze jednoho příslušného okna. Uzavření hlavních oken (okna preprocesoru či postprocesoru) se však fakticky rovná uzavření celého programu, neboť poté již nelze provádět žádné operace (to platí i při uzavření okna **TA.exe** – viz **obr. 2.2**).

4 Výpočet

Výpočet teplot v programu **TempAnalysis** je založen na metodě konečných prvků, časová diskretizace vychází z metody konečných rozdílů.

Tepelné zatížení (tepelný tok dopadající na hrany průřezu vystavené požáru) je uvažováno podle kapitoly 3.1 normy [1].

Výpočet je řešen jako jednorozměrný problém (jednorozměrné nestacionární vedení tepla). V případě dvourozměrného problému je využit zjednodušený algoritmus umožňující řešit úlohu odděleně – nejprve ve směru šířky *b*, poté ve směru výšky *h*.

Teplota v bodě (x,y) se uvažuje podle vztahu (4.1), uvedeného např. v publikaci [5].

$$\theta(x,y) = \theta(x) + \theta(y) - \frac{\theta(x)\cdot\theta(y)}{\theta(0)} \qquad [°C], \tag{4.1}$$

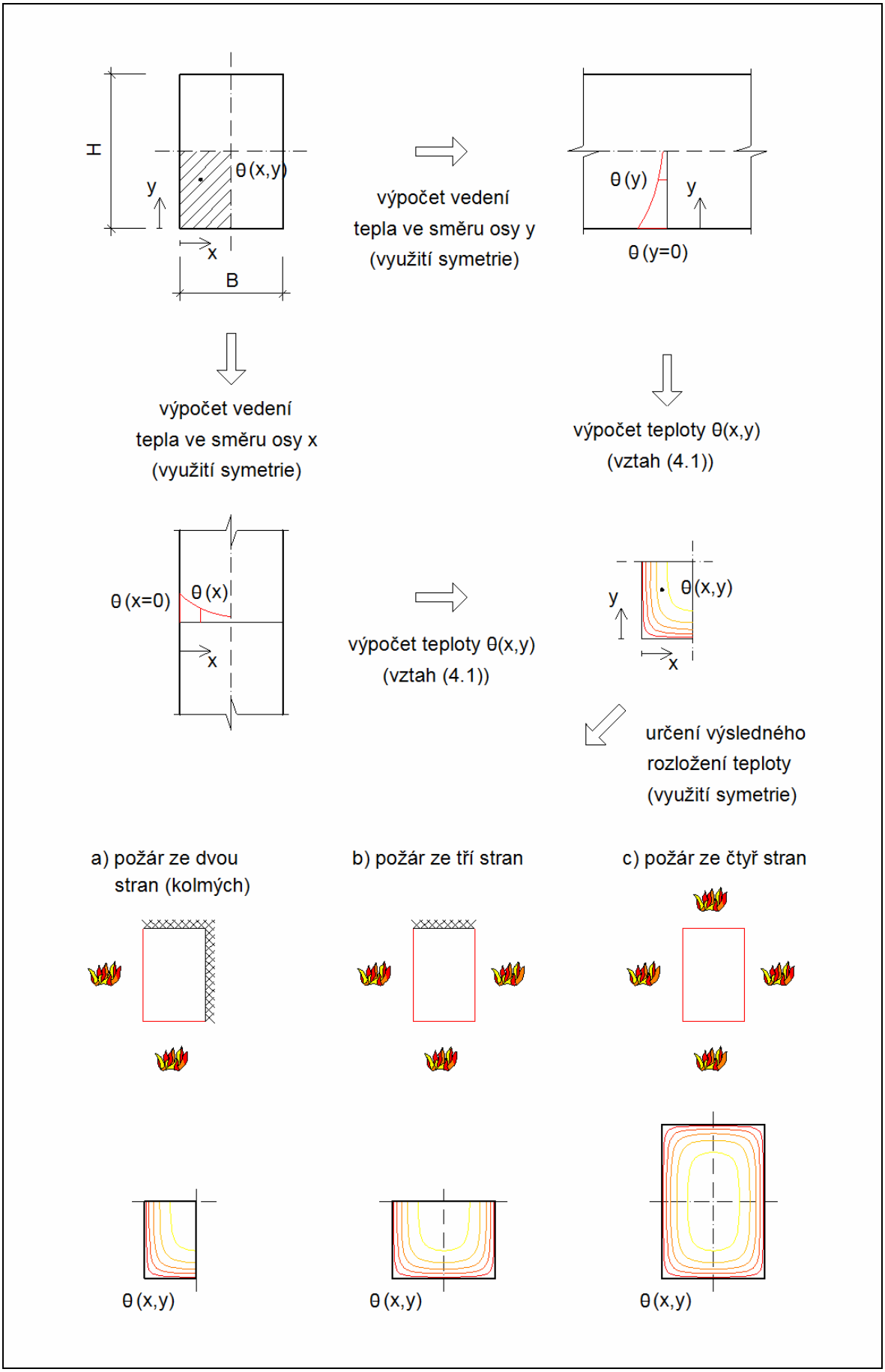
kde $\theta(x)$ – teplota v bodě *x* [°C], určená řešením vedení tepla v desce tloušťky *b*,
$\theta(y)$ – teplota v bodě *y* [°C], určená řešením vedení tepla v desce tloušťky *h*,
$\theta(0)$ – povrchová teplota prvku [°C] (průměrná hodnota z $\theta(x=0)$ a $\theta(y=0)$).

Uvedeným postupem lze řešit vedení tepla v obdélníkovém průřezu vystaveném požáru ze čtyř stran, ze tří stran či ze dvou navzájem kolmých stran (viz **obr. 4.1**).

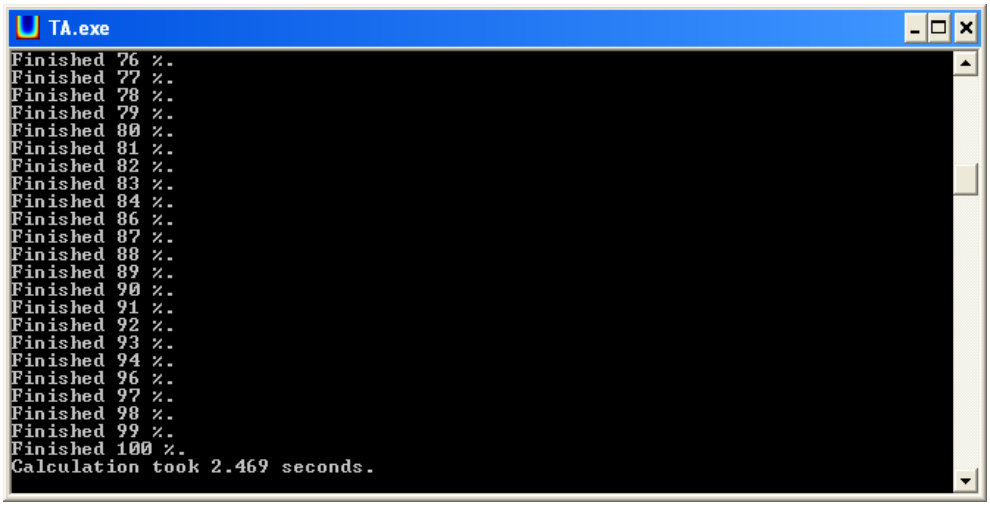
Při výpočtu se využívá symetrie průřezu a tepelného zatížení (viz **obr. 4.1**). Aby to bylo možné, zanedbává se na stranách nevystavených požáru tepelné zatížení (viz kapitola 3.1 normy [1]), což je bezesporu na straně bezpečnosti, neboť toto zatížení je definováno tepelným tokem z požárního úseku s definovanou teplotou 20 °C. To znamená, že zanedbáním tohoto zatížení se neuvažuje ochlazování prvků z vedlejšího požárního úseku. Přesný postup výpočtu je popsán v práci [6].

Výpočet se spustí stisknutím tlačítka **CALCULATION** v okně preprocesoru. Pokud jsou všechny parametry zadány správně, objeví se v černém okně **TA.exe** informace o aktuálním stavu výpočtu (viz **obr. 4.2**).

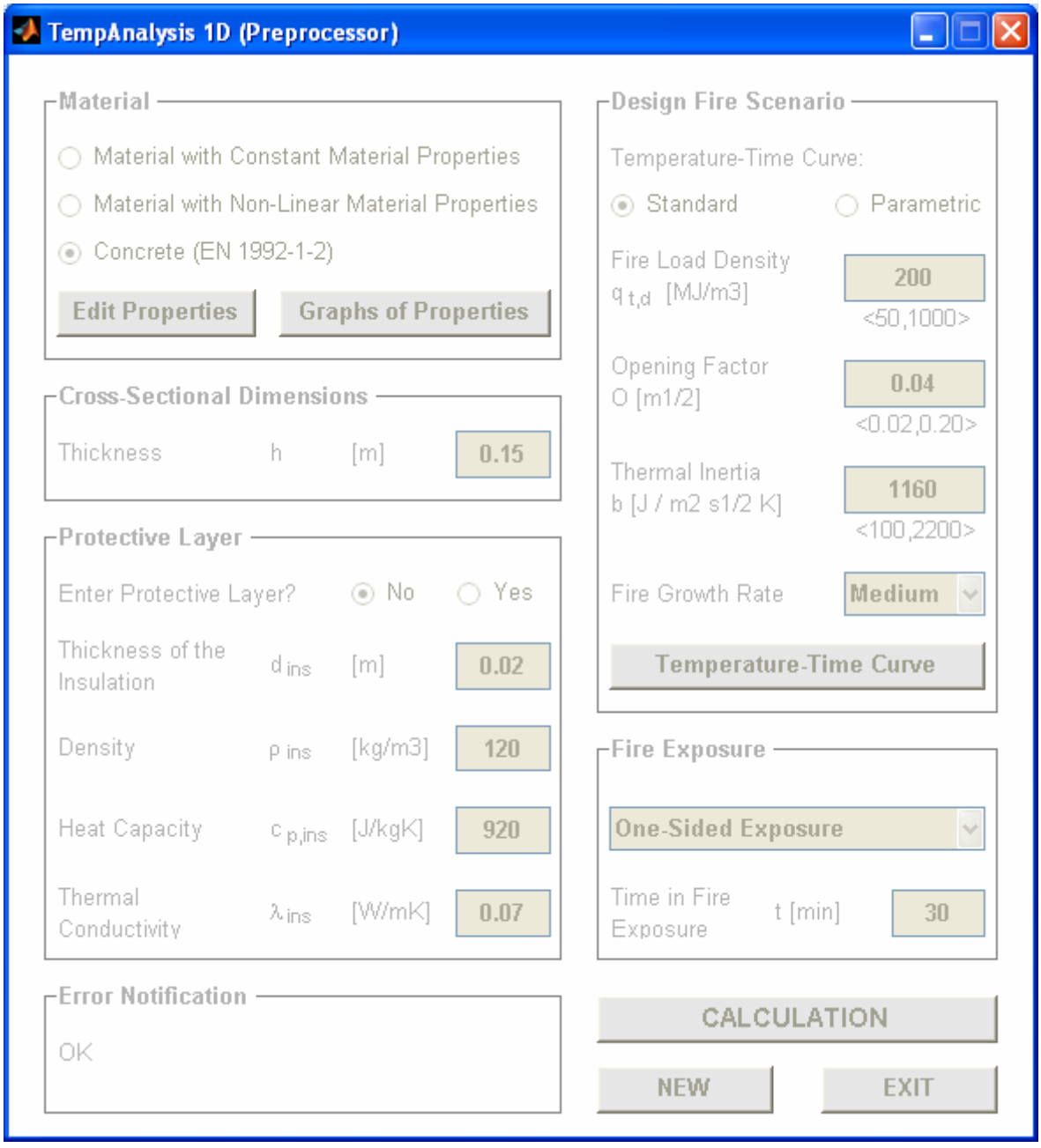
Po skončení výpočtu se objeví okno pro zobrazení výsledků výpočtu (okno postprocesoru, viz **obr. 5.1** a **obr. 5.2**) a zároveň dojde k deaktivování okna preprocesoru (viz **obr. 4.3**).



Obr. 4.1 *Zjednodušený postup stanovení rozložení teploty v obdélníkovém průřezu*



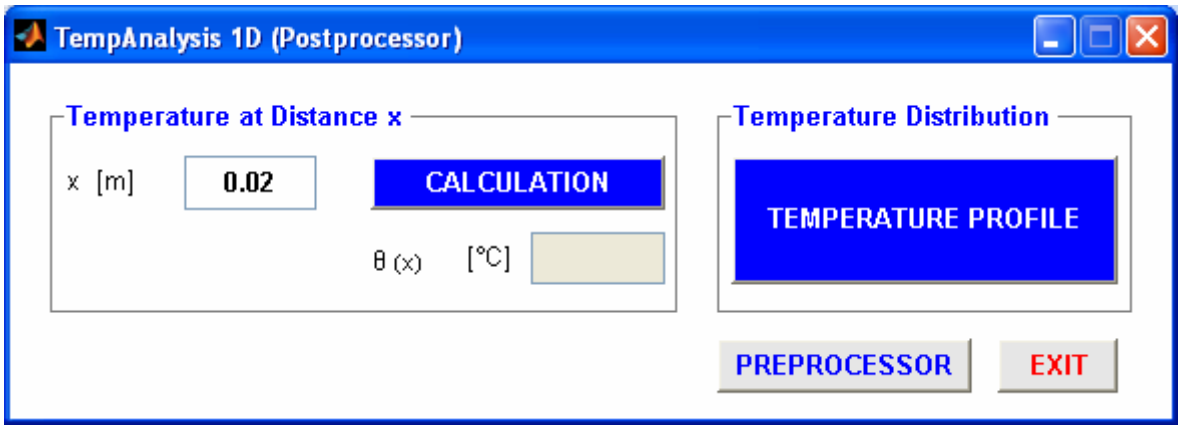
Obr. 4.2 *Okno* ***TA.exe*** *s aktuální informací o stavu výpočtu a o celkové délce výpočtu*



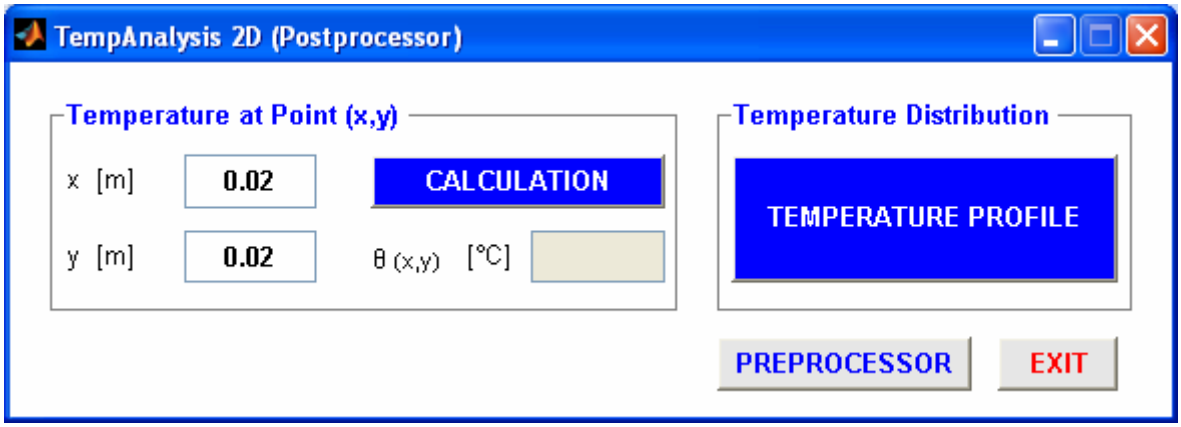
Obr. 4.3 *Deaktivované okno preprocesoru po skončení výpočtu*

5 Zobrazení výsledků výpočtu

Pro zobrazení výsledků výpočtu slouží okno postprocesoru (viz **obr. 5.1** a **obr. 5.2**). Program umožňuje vyčíslit teploty v jednotlivých bodech průřezu a zobrazit grafické znázornění rozložení teploty v průřezu.



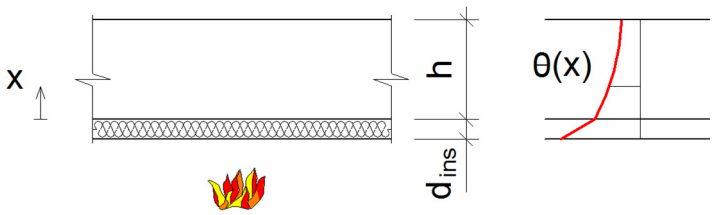
Obr. 5.1 *Okno pro zobrazení výsledků výpočtu, jednorozměrný problém*



Obr. 5.2 *Okno pro zobrazení výsledků výpočtu, dvourozměrný problém*

5.1 Teplota v zadaném bodě

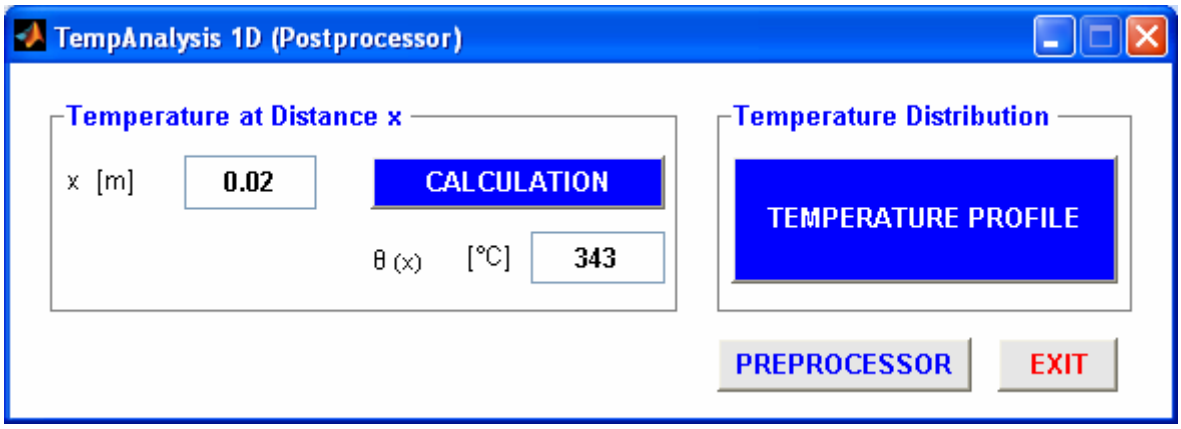
Bod, ve kterém má být zjištěna teplota, je v případě jednorozměrného problému definován vzdáleností *x* od líce průřezu. Pokud je průřez vystaven požáru z jedné strany, měří se vzdálenost *x* od líce vystaveného požáru. Je-li průřez opatřen izolací, uvažuje se vzdálenost *x* od rozhraní mezi touto izolací a materiálem vlastního průřezu (viz **obr. 5.3**). Teploty v izolační vrstvě nelze vyčíslit (hodnota *x* nemůže být zadána jako záporná), lze je však určit pomocí teplotního profilu (viz dále). Vzdálenost *x* může nabývat hodnot od 0 do *h*, kde *h* je tloušťka vlastního průřezu (bez izolace).



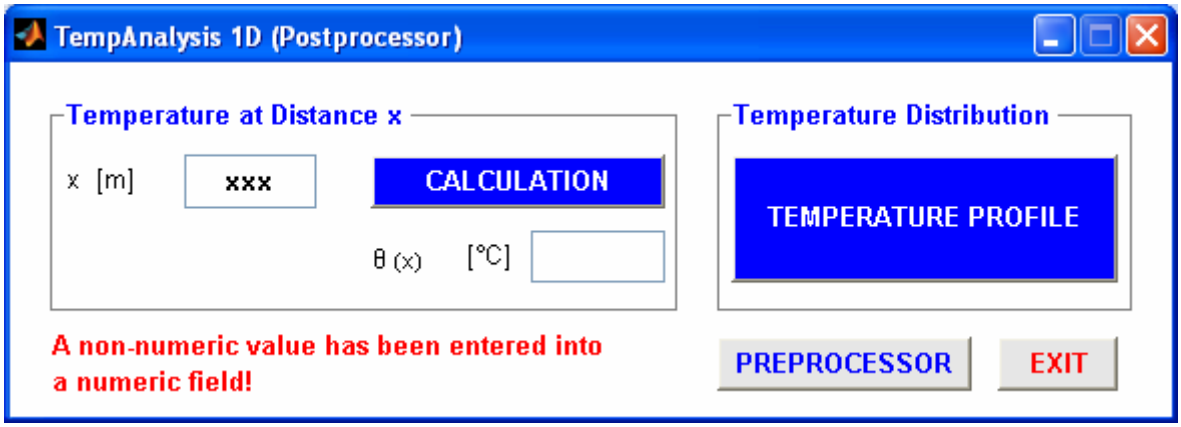
Obr. 5.3 *Teplota ve vzdálenosti x, izolovaný průřez vystavený požáru z jedné strany*

Po zapsání hodnoty *x* [m] do příslušného pole v okně postprocesoru a stisknutí tlačítka **CALCULATION** se v případě, že je zadaná hodnota *x* platná (tj. leží v intervalu 0 až *h*), pod tímto tlačítkem zobrazí příslušná teplota $\theta(x)$ [°C] (viz **obr. 5.4**).

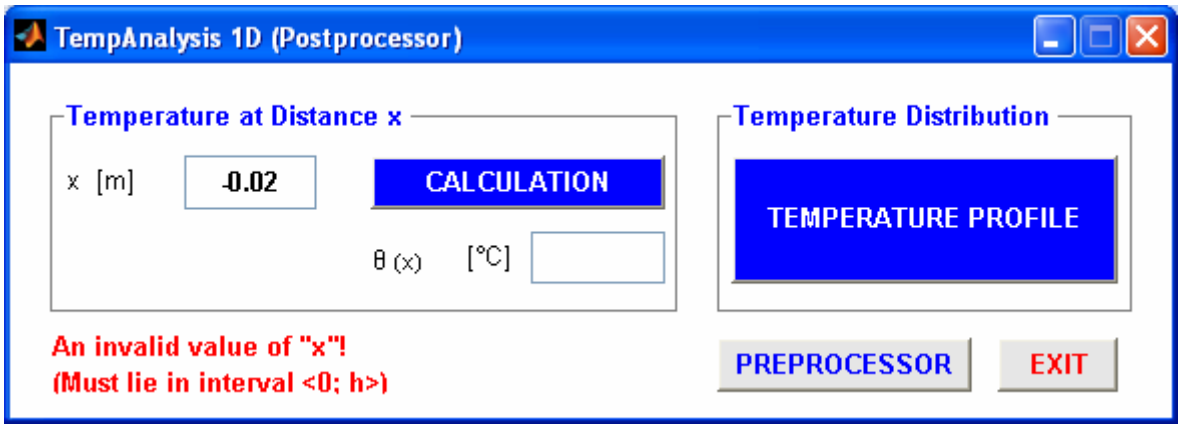
Pokud je hodnota *x* neplatná, objeví se ve spodní části okna chybové hlášení (viz **obr. 5.5** a **obr. 5.6**).



Obr. 5.4 *Vypsání tepoty ve vzdálenosti x od líce průřezu*



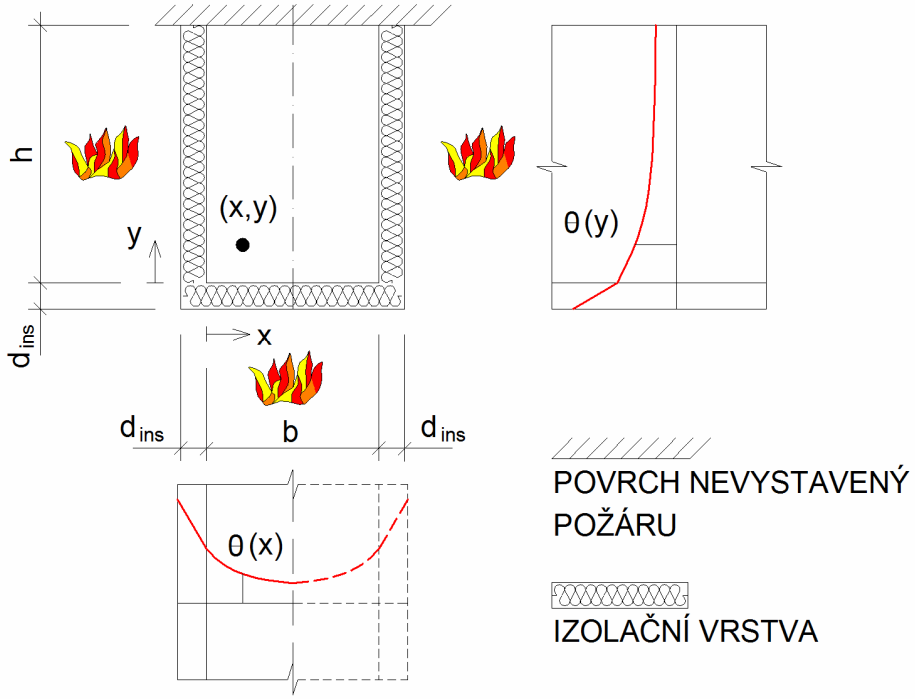
Obr. 5.5 *Chybové hlášení z důvodu zadání neplatného řetězce znaků*



Obr. 5.6 *Chybové hlášení z důvodu zadání neplatné hodnoty (záporné číslo)*

V případě dvourozměrného problému je bod, ve kterém má být zjištěna teplota, definován souřadnicemi (x,y). Tyto souřadnice se opět měří od líce průřezu (pokud je průřez bez izolace), resp. od rozhraní mezi izolací a vlastním materiálem (viz **obr. 5.7**).

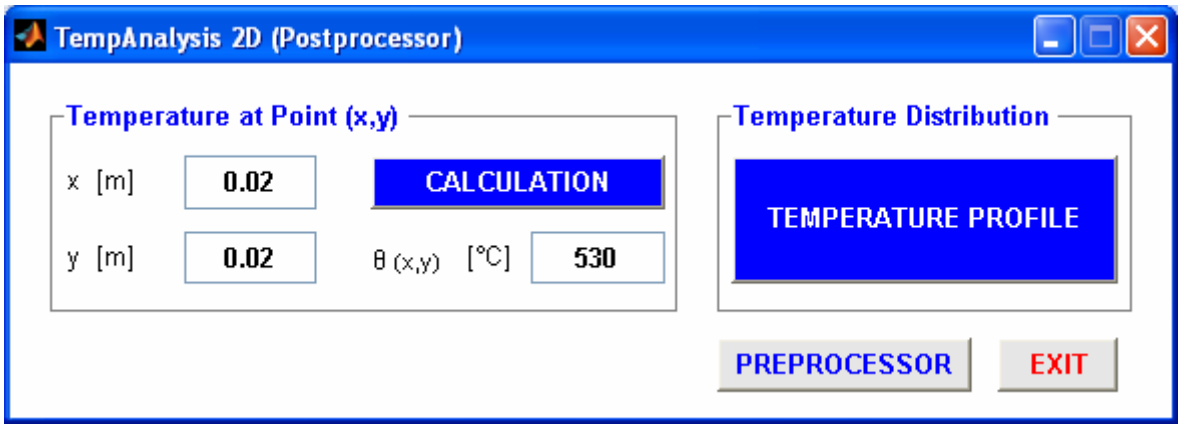
Souřadnice *x* může nabývat hodnot od 0 do *b*, kde *b* je šířka vlastního průřezu (bez izolace). Souřadnice *y* může nabývat hodnot od 0 do *h*, kde *h* je výška vlastního průřezu (bez izolace).



Obr. 5.7 *Teplota v bodě (x,y), izolovaný průřez vystavený požáru ze tří stran*

Po zapsání hodnot *x* [m] a *y* [m] do příslušných polí v okně postprocesoru a stisknutí tlačítka **CALCULATION** se v případě, že jsou zadané hodnoty *x* a *y* platné (tj. leží v intervalu 0 až *b*, resp. 0 až *h*), pod tímto tlačítkem zobrazí příslušná teplota $\theta(x,y)$ [°C] (viz **obr. 5.8**).

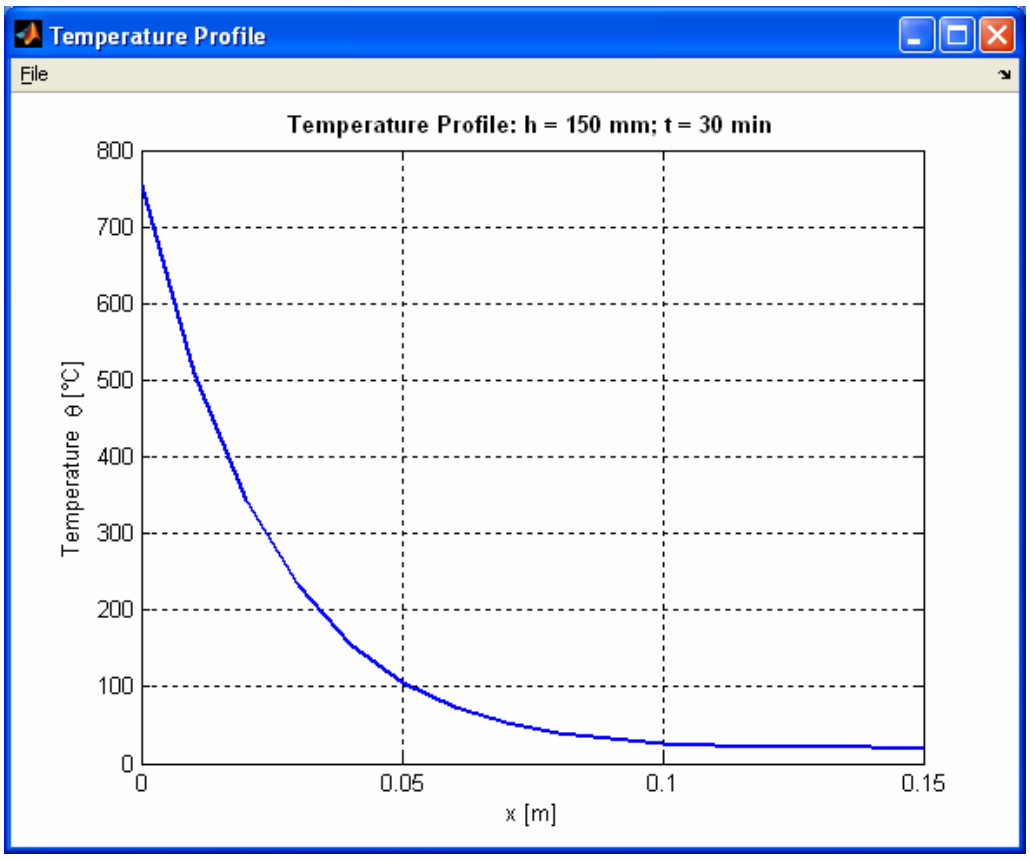
Pokud je některá ze zadaných souřadnic neplatná, objeví se ve spodní části okna chybové hlášení (analogicky k předchozímu případu – **obr. 5.5** a **obr. 5.6**).



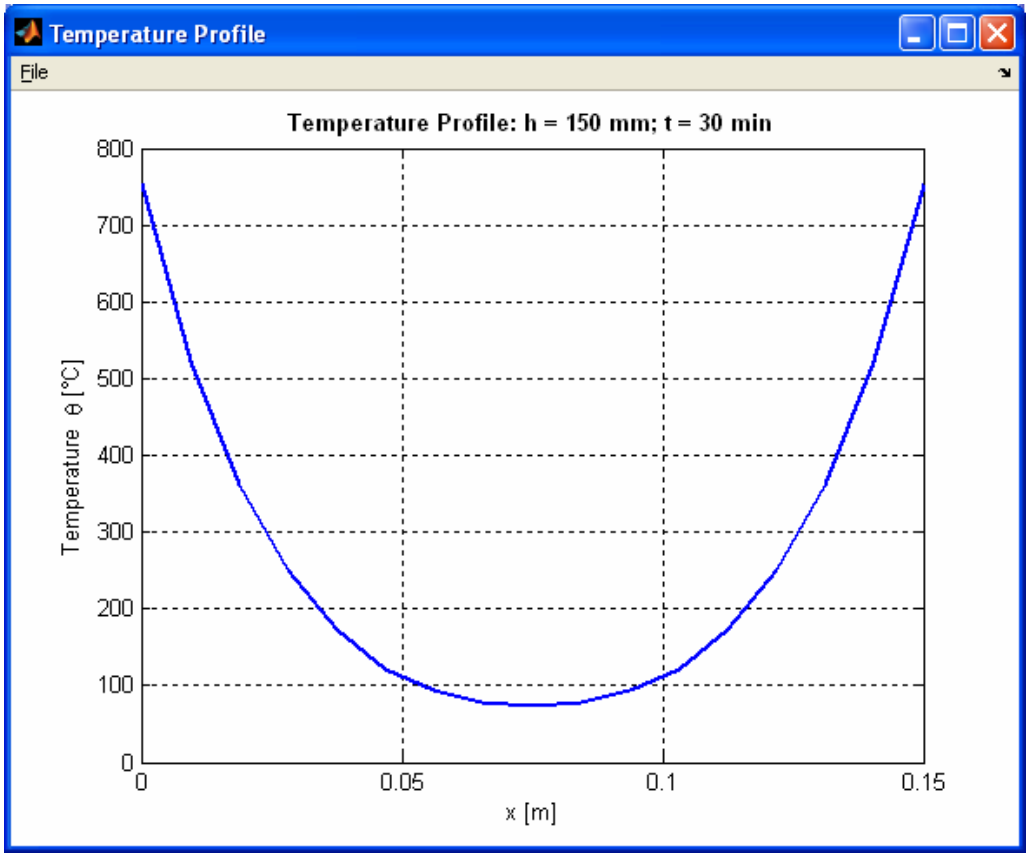
Obr. 5.8 *Vypsání tepoty v bodě (x,y)*

5.2 Grafické znázornění rozložení teploty v průřezu

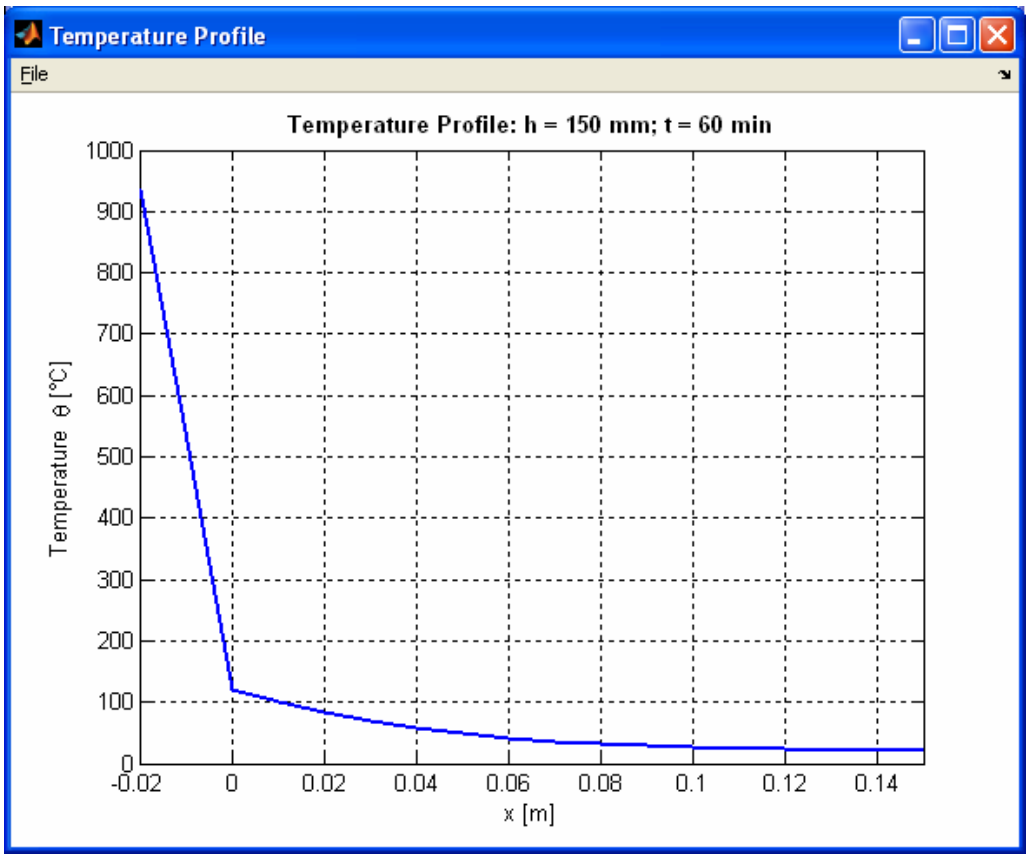
Stisknutím tlačítka **TEMPERATURE PROFILE** v pravé části okna postprocesoru se zobrazí tzv. teplotní profil – grafické znázornění rozložení teploty v průřezu. Příklady teplotních profilů desek (resp. stěn) jsou uvedeny na **obr. 5.9–5.12**. V případě jednorozměrného problému je teplotní profil zobrazen včetně izolace (pokud je průřez izolován). Údaje v názvu grafu (tloušťka průřezu, doba vystavení požáru) se nastavují automaticky podle zadání.



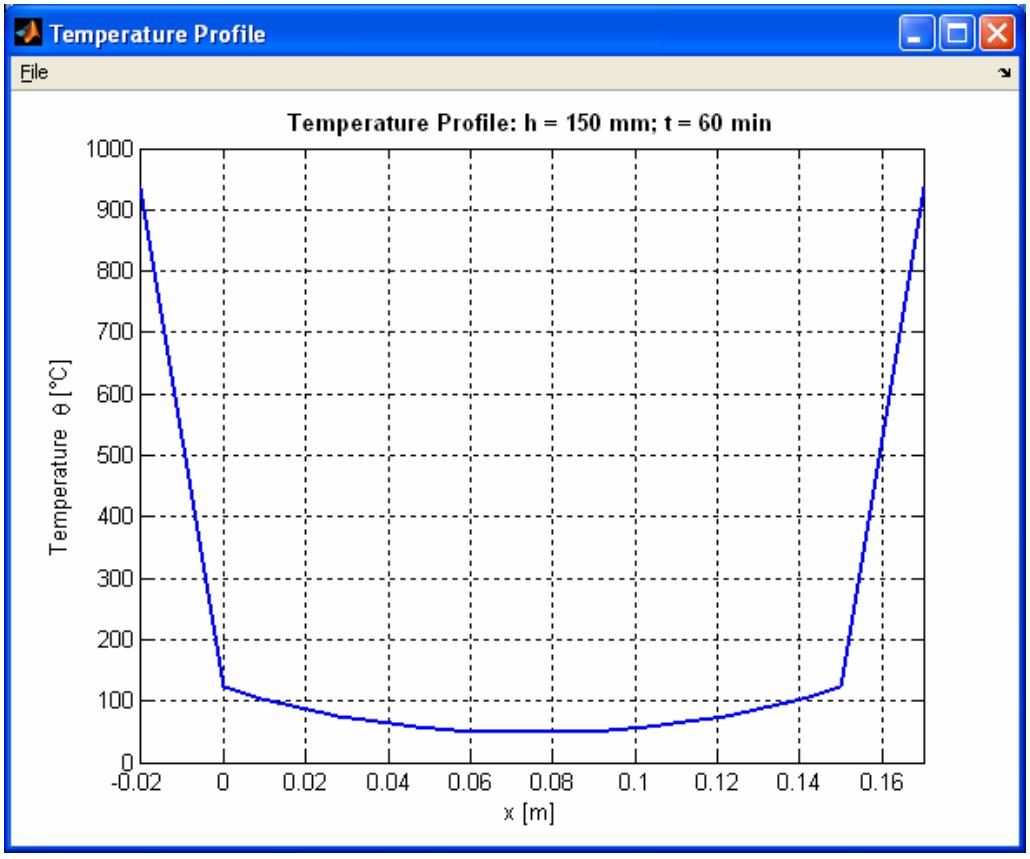
Obr. 5.9 *Teplotní profil průřezu tloušťky h = 150 mm, doba vystavení požáru t = 30 minut, požár působí z jedné strany, průřez není opatřen izolací*



Obr. 5.10 *Teplotní profil průřezu tloušťky h = 150 mm, doba vystavení požáru t = 30 minut, požár působí z obou stran, průřez není opatřen izolací*

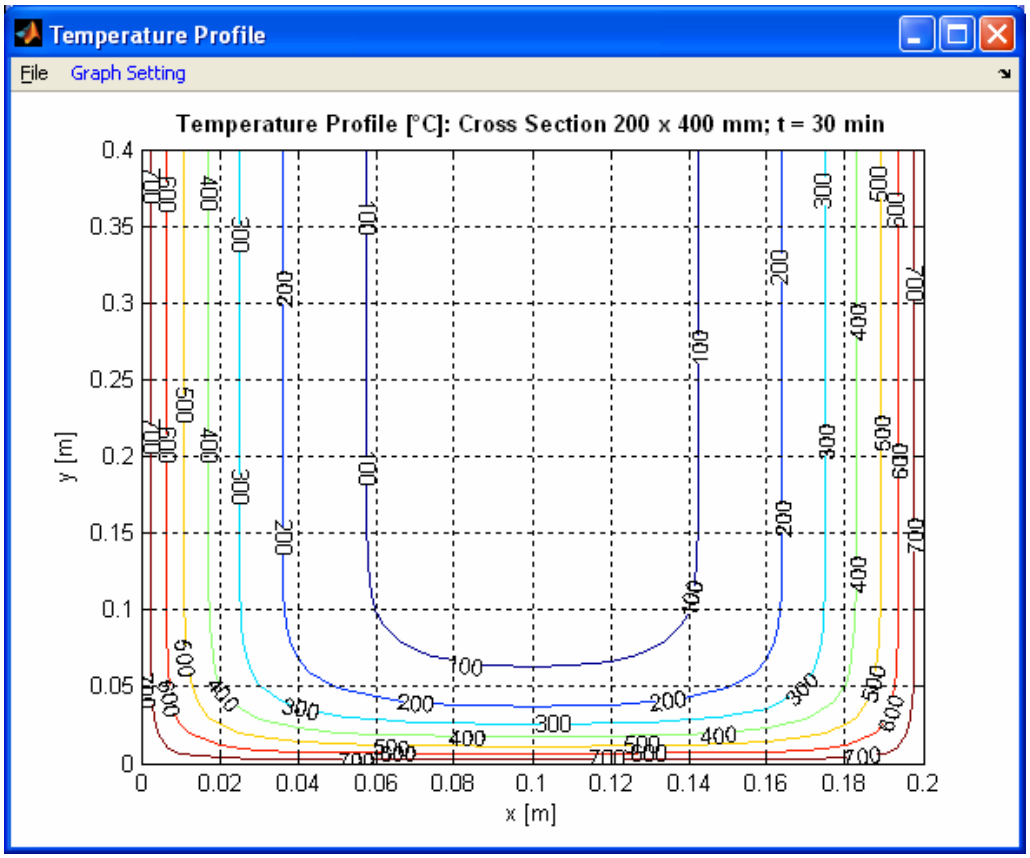


Obr. 5.11 *Teplotní profil průřezu tloušťky h = 150 mm, doba vystavení požáru t = 60 minut, požár působí z jedné strany, průřez je opatřen izolací tloušťky* d_{ins} *= 20 mm*



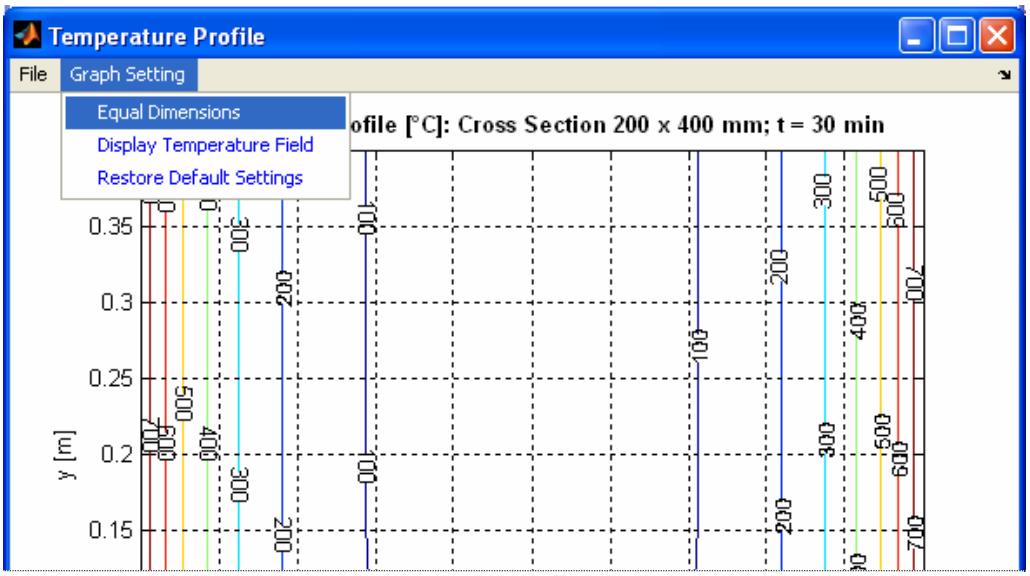
Obr. 5.12 *Teplotní profil průřezu tloušťky h = 150 mm, doba vystavení požáru t = 60 minut, požár působí z obou stran, průřez je opatřen izolací tloušťky* d_{ins} *= 20 mm*

Teplotní profily trámů (resp. sloupů) jsou zobrazeny pomocí izoterem (čar spojujících body se stejnou teplotou). Rozložení teploty v izolační vrstvě se nevykresluje. Údaje v názvu grafu (rozměry průřezu, doba vystavení požáru, izolace) se nastavují automaticky podle zadání. Na **obr. 5.13** je uveden příklad teplotního profilu průřezu vystaveného požáru ze tří stran.

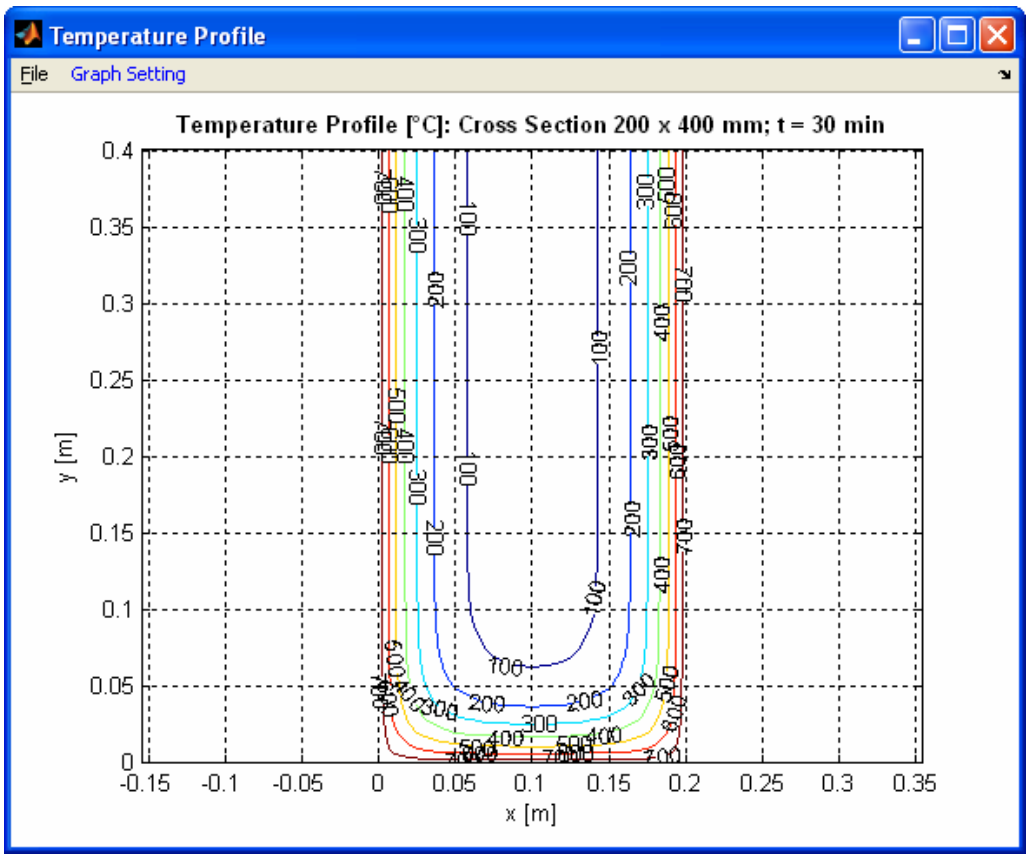


Obr. 5.13 *Teplotní profil průřezu 200 x 400 mm, doba vystavení požáru t = 30 minut, požár působí ze tří stran, průřez není opatřen izolací*

Velikost grafu vychází z přednastavených rozměrů okna **Temperature Profile**. Pro vykreslení v měřítku lze využít příkazu **Graph Setting** → **Equal Dimensions** (viz **obr. 5.14**). Výsledný graf viz **obr. 5.15**.



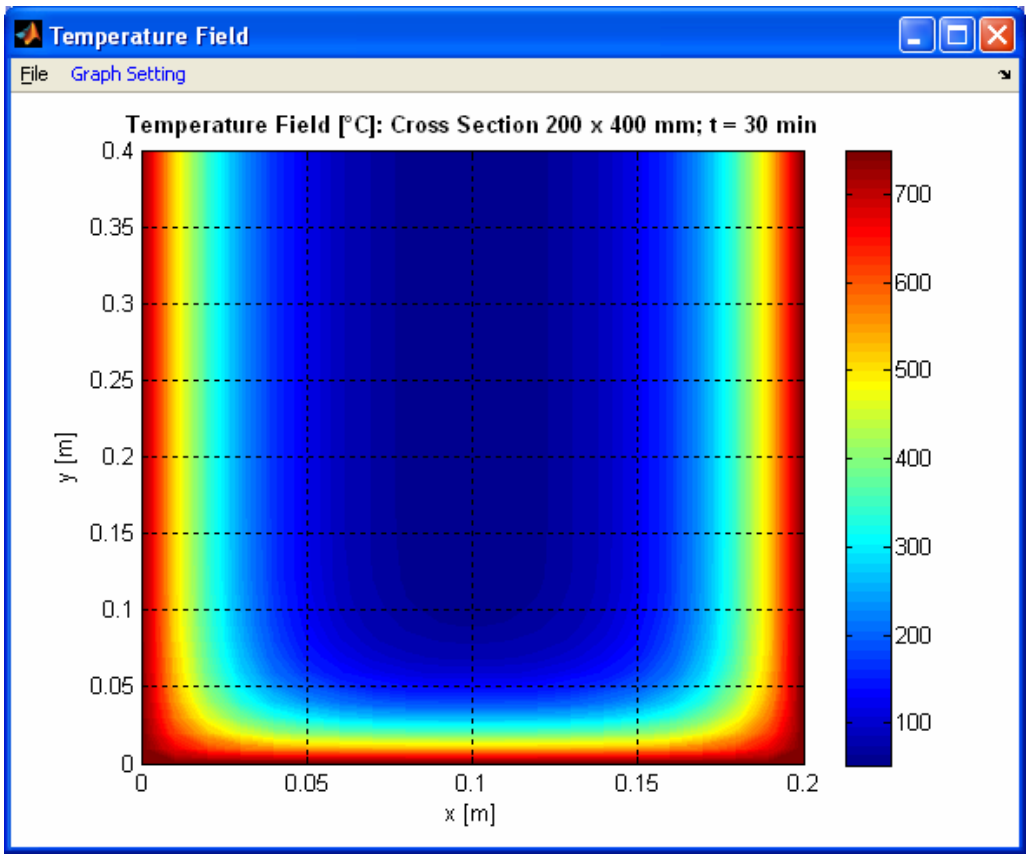
Obr. 5.14 *Položka pro úpravu grafu* ***Graph Setting*** *v menu okna* ***Temperature Profile***



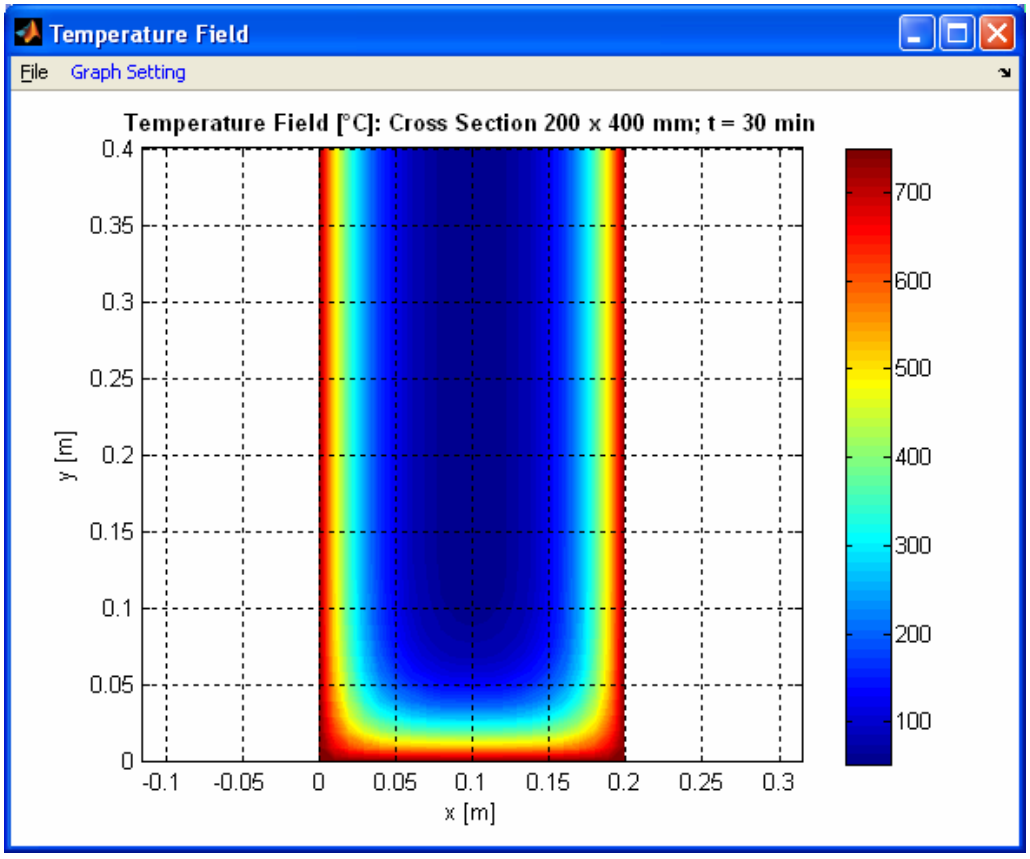
Obr. 5.15 *Teplotní profil v měřítku*

Další volbou pro upravení grafu je vykreslení teplotního pole (**Graph Setting** → **Display Temperature Field**), ve kterém jsou izotermy nahrazeny izoplochami vyjadřujícími teplotu pomocí barevné škály. Na **obr. 5.16** je zobrazeno teplotní pole nahrazující teplotní profil z **obr. 5.13**.

Také v případě teplotního pole je možné vykreslit graf v měřítku, viz **obr. 5.17**. Po zadání příkazu **Graph Setting** → **Restore Default Settings** se zobrazí původní teplotní profil (**obr. 5.13**).



Obr. 5.16 *Teplotní pole průřezu 200 x 400 mm, doba vystavení požáru t = 30 minut, požár působí ze tří stran, průřez není opatřen izolací*



Obr. 5.17 *Teplotní pole v měřítku*

5.3 Tlačítka PREPROCESSOR a EXIT

Tlačítko **PREPROCESSOR** slouží k návratu do okna preprocesoru. Po případném upravení některého ze vstupních parametrů je nutné výpočet opakovat (tlačítko **CALCULATION**).

Stisknutím tlačítka EXIT dojde k ukončení programu (viz **kapitola 3.6**).

6 Ověření správnosti výpočtu teplot

Ověření správnosti výpočtu tepot v programu **TempAnalysis** lze provést porovnáním teplotních profilů získaných pomocí tohoto programu (pro beton) s teplotními profily uvedenými v normě ČSN EN 1992-1-2 [2].

Normové profily vycházejí z následujících vstupů ([2], příloha A, odst. (2)):

- vlhkost betonu u = 1,5 %,
- dolní mez koeficientu tepelné vodivosti,
- emisivita betonového povrchu ε_m = 0,7,
- součinitel přestupu tepla prouděním α_c = 25 W·m^{-2}·K^{-1} (normový požár).

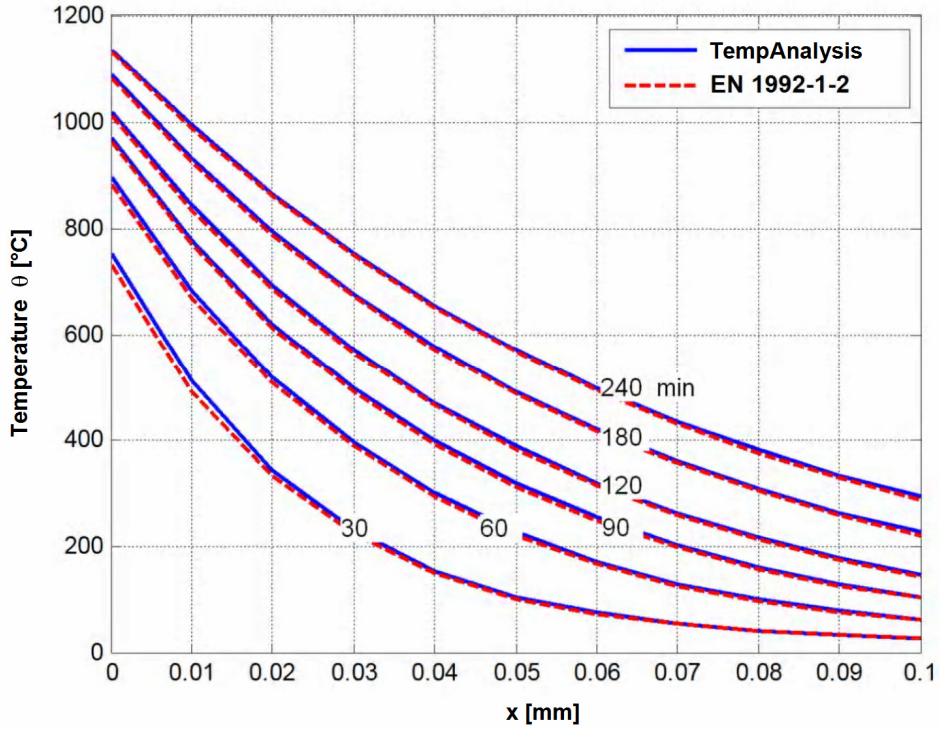
V normě [2] není přesně specifikováno, jaká hodnota objemové hmotnosti betonu při 20 °C byla při výpočtu uvažována, ale lze předpokládat hodnotu $\rho(20)$ = 2300 kg·m^{-3} (viz [2], článek 3.3.2, odstavec (4)).

Stejné vstupy byly zadány také při výpočtu v programu **TempAnalysis** (materiál: beton, $\rho(20)$ = 2300 kg·m^{-3}, u = 1,5 %, dolní mez koeficientu tepelné vodivosti, průřez bez izolace, normový požár).

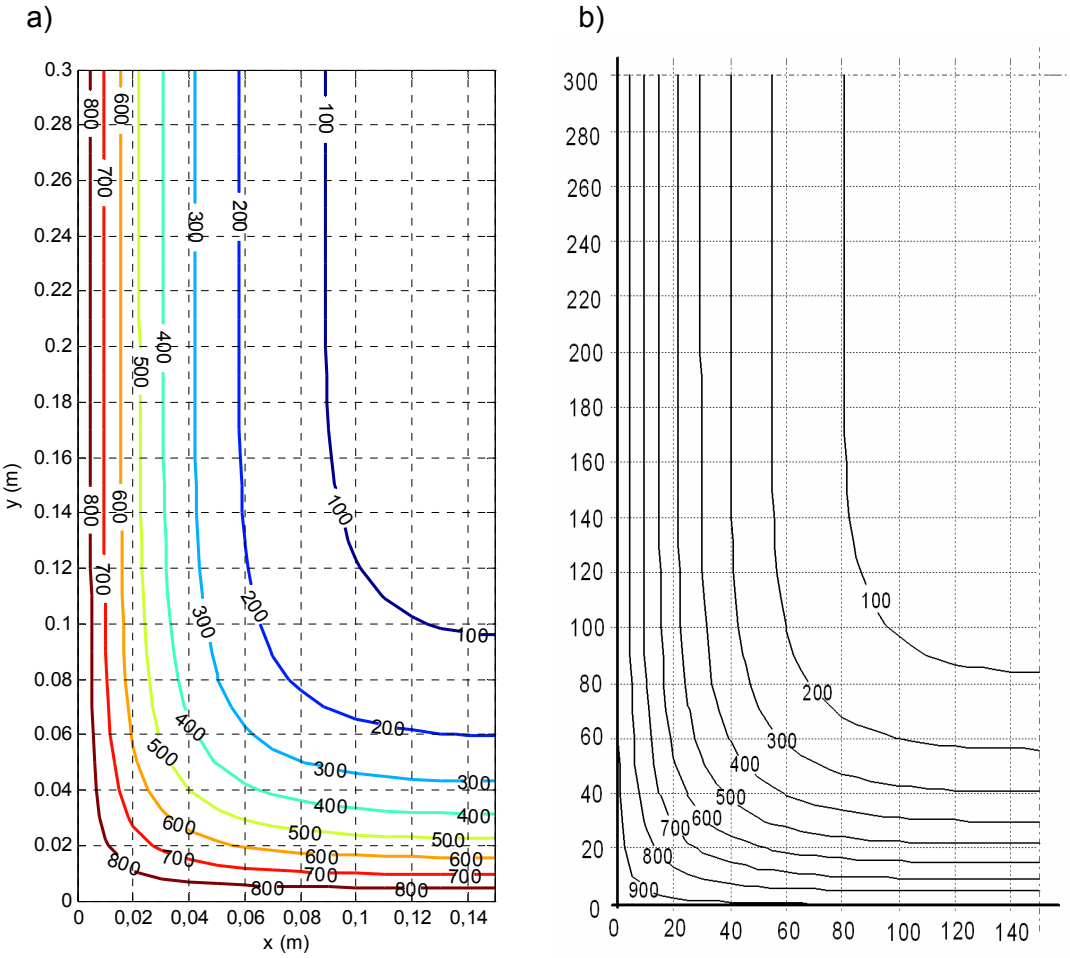
Profily byly porovnány na následujících průřezech:

- deska tloušťky h = 200 mm, požár působí z jedné strany, doba vystavení požáru postupně 30, 60, 90, 120, 180 a 240 minut,
- trám o rozměrech b = 300 mm a h = 600 mm, požár působí ze tří stran, doba vystavení požáru t = 60 minut a t = 120 minut,
- sloup o rozměrech b = 300 mm a h = 300 mm, požár působí ze čtyř stran, doba vystavení požáru t = 120 minut,

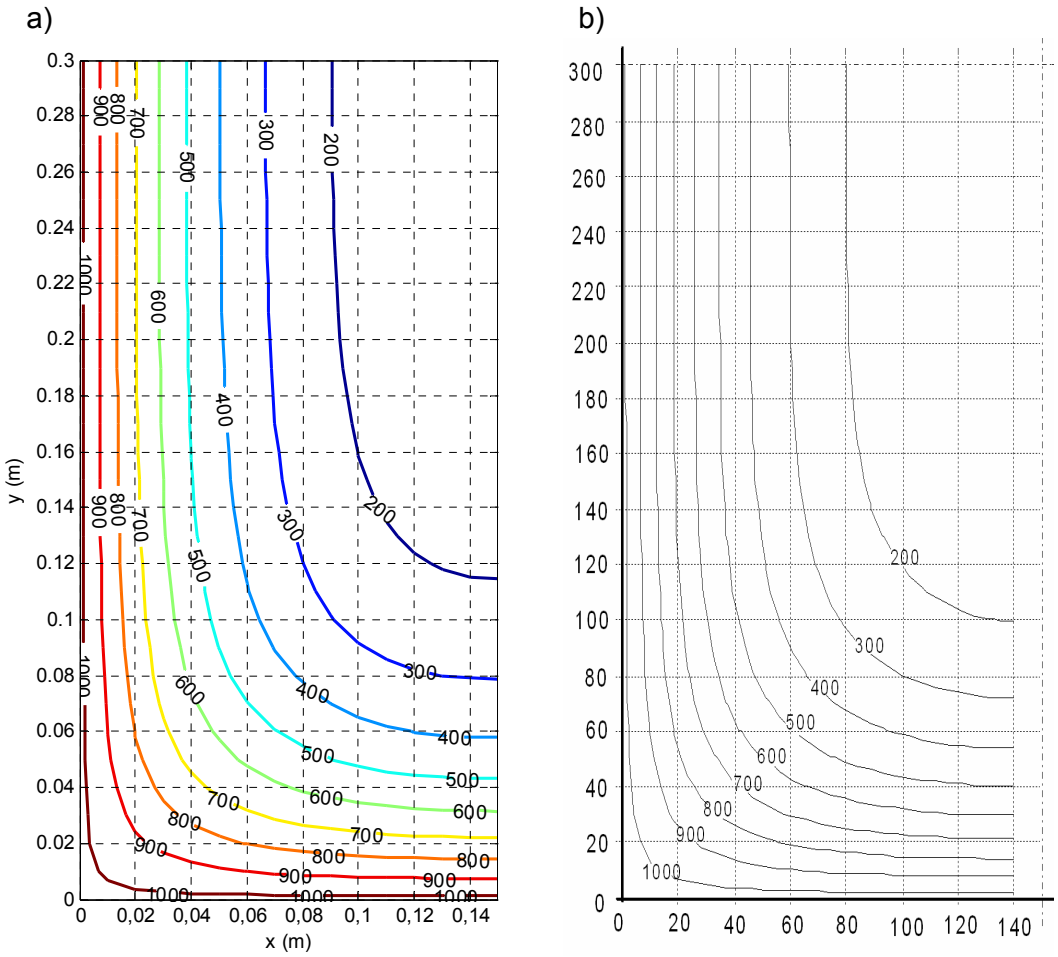
Porovnání teplotních profilů je znázorněno na **obr. 6.1–6.4**, ze kterých je patrné, že teplotní profily určené pomocí programu **TempAnalysis** jsou v souladu s teplotními profily dle normy [2].



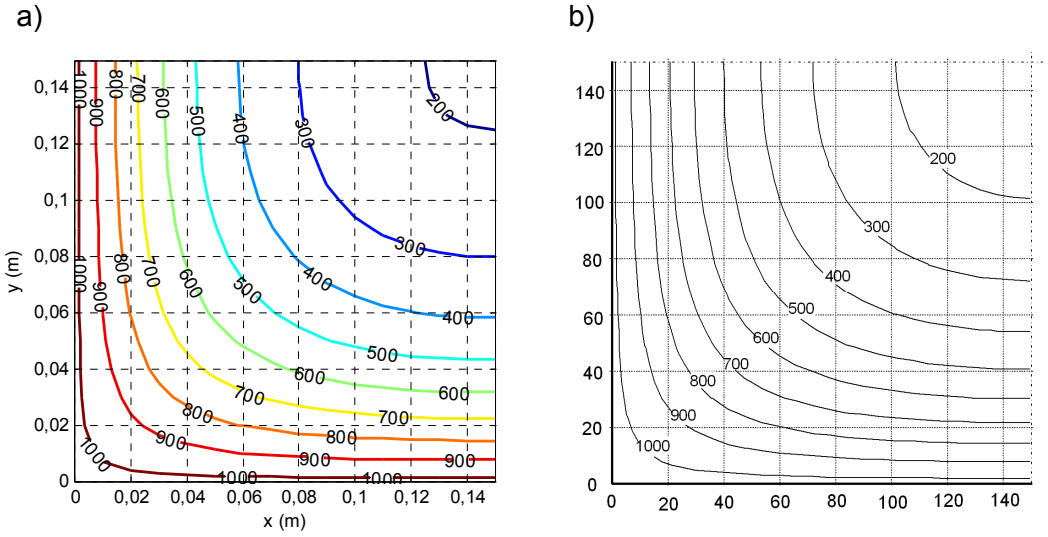
Obr. 6.1 *Porovnání teplotních profilů betonové desky tloušťky h = 200 mm (zobrazena polovina průřezu) dle ČSN EN 1992-1-2 ([2], obr. A.2) a dle programu* ***TempAnalysis***



Obr. 6.2 *Porovnání teplotních profilů průřezu* ***300 x 600*** *mm (zobrazena čtvrtina průřezu), vystavení požáru ze tří stran po dobu* ***60*** *minut, a) program* ***TempAnalysis****, b) ČSN EN 1992-1-2 ([2], obr. A.7a)*



Obr. 6.3 *Porovnání teplotních profilů průřezu* ***300 x 600*** *mm (zobrazena čtvrtina průřezu), vystavení požáru ze tří stran po dobu* ***120*** *minut, a) program* ***TempAnalysis****, b) ČSN EN 1992-1-2 ([2], obr. A.8)*



Obr. 6.4 *Porovnání teplotních profilů průřezu* ***300 x 300*** *mm (zobrazena čtvrtina průřezu), vystavení požáru ze čtyř stran po dobu* ***120*** *minut, a) program* ***TempAnalysis****, b) ČSN EN 1992-1-2 ([2], obr. A.14)*

7 Seznam použitých zdrojů

[1] ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: ČNI, srpen 2004.

[2] ČSN EN 1992-1-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.* Praha: ČNI, listopad 2006.

[3] *MATLAB* [počítačový program]. Verze 7.4.0.287 (R2007a). The MathWorks (USA), 2007. URL <www.mathworks.com>.

[4] Wald, F. a kol. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005. 336. s. ISBN 80-01-03157-8.

[5] Hertz, K. *Users Guide for the Program ConTemp.exe* [online]. 2006. URL <http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/software/contemp_users_guide.pdf>.

[6] Štefan, R. *Posuzování betonových prvků vystavených požáru.* Diplomová páce (Ing.). Praha: ČVUT. Fakulta stavební. Katedra betonových a zděných konstrukcí. 2008. Vedoucí práce: Prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.