



NUMERICKÉ OVĚŘENÍ EXPERIMENTU ZATÍŽENÍ KOMPOZITNÍHO PANELU KONTAKTNÍM VÝBUCHEM V PROGRAMU LS-DYNA

JANOTA Ondřej¹

Abstrakt:

Tento článek prezentuje výsledky numerického modelování výbuchového experimentu plného měřítka zaměřeného na zkoumání výbuchové odolnosti betonových panelů zatížených kontaktním výbuchem. Experiment proběhl ve vojenském prostoru Boletice ve spolupráci s Armádou České republiky. Zkušební vzorky byly nejdříve zatíženy blízkým výbuchem uprostřed a následně kontaktním výbuchem na krajích v místech neovlivněných výbuchem blízkým. Během experimentálního programu bylo vyzkoušeno mnoho typů betonu. Pro ověření výsledků experimentů byly vytvořeny různé numerické modely a porovnány. Pro numerické ověření experimentu byl použit program LS-DYNA. V článku jsou představeny různé přístupy pro modelování experimentu jak z hlediska výsledků, tak nároků na výpočetní techniku. Dále popsány dva použité materiálové modely a následně jsou uvedeny další výzkumné cíle.

Klíčová slova: Kontaktní výbuch, materiálové modely betonu, numerické modelování, metoda Arbitrary Lagrangian-Eulerian, metoda Smoothed-particle hydrodynamics

1. Experimentální program

V letech 2010 až 2016 bylo provedeno experimentální měření odezvy betonových panelů na zatížení jak blízkým, tak i kontaktním výbuchem. Měření byla prováděna ve vojenském prostoru Boletice ve spolupráci s Armádou České republiky. Pro experiment byly použity betonové vzorky v plném měřítku o rozměrech 6000 x 1500 x 300 mm. Každý vzorek byl nejprve uveden do vodorovné polohy a prostě uložen nad zkušební jámu. Takto uložený panel byl nejdříve zatížen blízkým výbuchem vyvolaným detonací 25 kg TNT ve vzdálenosti 450 mm nad horním povrchem panelu [1].

Po prozkoumání a zaznamenání výsledků blízkého výbuchu byly panely pomocí autojeřábu uvedeny do svislé polohy a zajištěny proti ztrátě stability. Následně byly na panel umístěny dvě kontaktní plastické trhaviny obvykle o hmotnostech 2,8 a 4,2 kg. Umístění náloží bylo zvoleno ve vzdálenosti 750 mm (obr. 1) od spodní hrany a kraje panelu. Takovýmto uspořádáním experimentu byl panel pomyslně rozdělen na třetiny a bylo umožněno použití jednoho betonového vzorku pro všechna tři měření [1].

¹Ondřej Janota, e-mail: Ondrej.Janota@fsv.cvut.cz,

Supervisor: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.



Obr. 1. Úspořádání experimentu kontaktního výbuchu



Obr. 2. Kontaktní strana (vlevo) a odvrácená strana (vpravo) poškozená kontaktním výbuchem s výbušninou o hmotnosti 2,8 kg

Tlaková pevnost jednotlivých betonových vzorků se pohybuje od pevnosti běžně používaných betonů (krychelná pevnost okolo 45 MPa) až po betony s krychelnou pevností přesahují 120 MPa. Do všech směsí betonu byly přidány ocelové drátky pro zvýšení tahové pevnosti a lomové energie betonu. Pro zvýšení heterogenity vzorků a zvýšení jejich výbuchové odolnosti byly do některých vzorků přidány pro betonové prvky atypické materiály.

Výztuž všech panelů byla provedena stejně. Podélnou výztuž panelů tvořilo 11 profilů o průměru 16 mm při obou površích. Příčnou výztuž tvořili třmínky o průměru 10 mm uložené po 150 mm. Smyková výztuž byla tvořena sponami o průměru 8 mm. Celkově bylo použito 9 ks/m^2 spon [1].

2. Numerické modelování experimentu

K numerickému modelování experimentu byl použit software LS-DYNA, který je běžně používán i pro modelování velmi rychlých dynamických jevů jako jsou výbuchy, nárazy, apod. Cílem numerického modelování provedených experimentů je získání detailního popisu vývoje tlakové vlny a průběhu přetlaku na rozhraní vzorek-výbušnina a dále pochopení odezvy vzorku na zatížení. Vzhledem k relativně malému množství informací o modelování kontaktního výbuchu byly na základě informací uvedených v [2] zvoleny tři modelovací přístupy výbuchu, které byly srovnány z hlediska náročnosti na výpočetní čas, paměť a dále byla sledována tlaková vlna na povrchu panelu.



Pro zjednodušení modelu a snížení výpočetních nároků byl model konstruován ve dvou verzích. V obou případech byla uvažována pouze třetina panelu o rozměrech 1500 x 1500 x 300 mm. První model dále zohledňoval symetrii panelu a byla modelována pouze čtvrtina panelu a výbušniny. Tento přístup se neosvědčil a na plochách symetrie často docházelo k jevům znehodnocujících výpočet, proto nebude tento model v dalších fázích článku vyhodnocen. V druhém modelu byla modelována celá třetina panelu a celá výbušnina. Tento model bez využití symetrie se ukázal funkčnější a byl dále používán.

Každá metoda byla provedena pro materiálové modely MAT_72_REL3 a MAT_159 [3], které umožňují vhodně popsat chování betonu a je zapotřebí jen minimum vstupů pro implementování materiálu do modelu. Materiálový model MAT_72_REL3 nemá implementovanou podmínku eroze, která v případě překročení daného napětí nebo přetvoření vyřadí element z výpočtu. Podmínka musí být zavedena do výpočtu zvláštních funkcí. Pro srovnání obou materiálů byla pro materiál MAT_72_REL3 stanovena podmínka eroze při dosažení maximálního přetvoření 0,3 strainu.

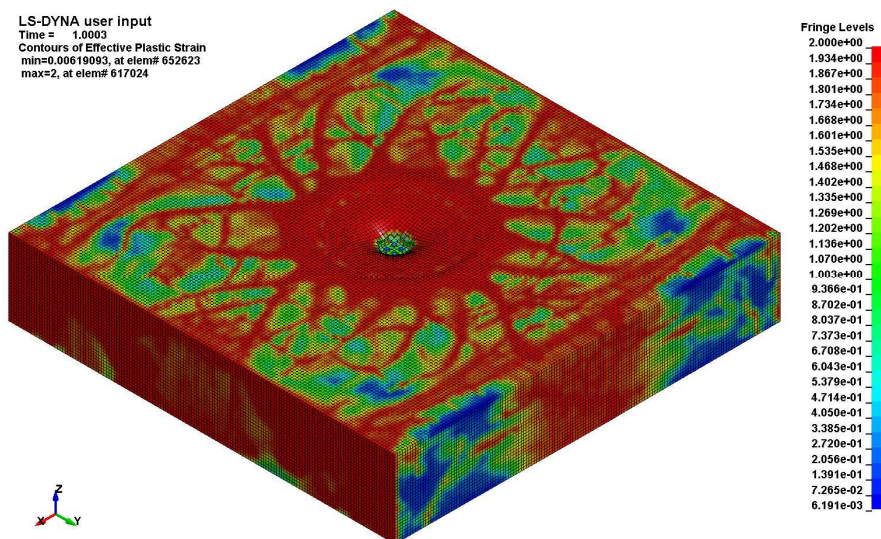
V první fázi numerického modelování nebyla v panelu modelována betonářská výztuž a byl uvažován pouze prostý beton. Tento postup byl zvolen pro snazší tvorbu modelů při počáteční optimalizaci výpočetních metod, která se ukázala jako náročnější, než byl původní předpoklad. Pro každou metodu a materiál byly dále vytvořeny modely s krokem sítě 10 a 20 mm, které byly porovnány. Vzhledem k náročnosti na výpočetní vybavení, nebylo u některých metod možné zvolit menší krok sítě. Přehled výpočetních modelů a jejich nároků na výpočetní čas a paměť jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 – Použité výpočtové modely a materiály a parametry výpočtu

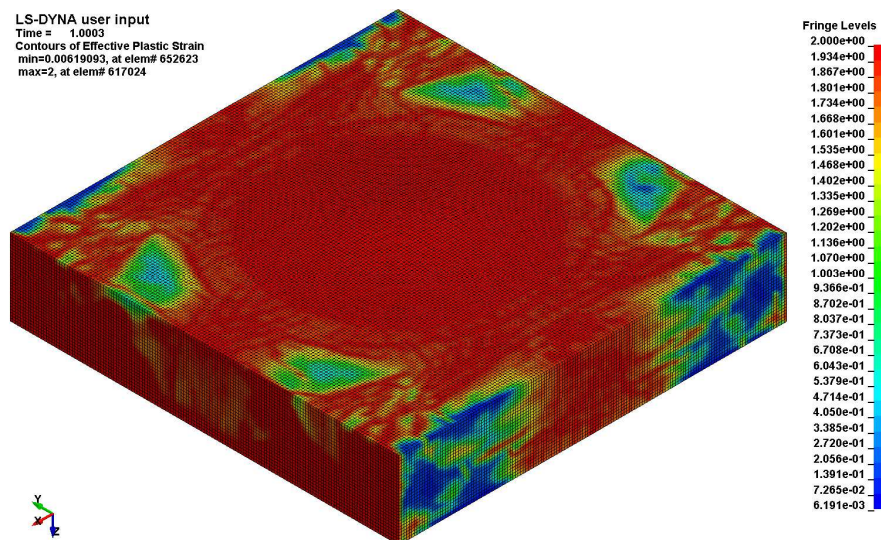
2,8 kg výbušniny - panel 1500 x 1500 x 300 mm						
Typ výpočtu	Velikost sítě [mm]	Počet prvků	Výpočetový čas [s]	Počet jader procesoru	Využitá paměť [bite]	Maximální tlak na kontaktním povrchu [GPa]
LBE (MAT 72)	20	84375	55	1	19144139	1.75
	10	675000	1498	1	150003378	1.9604
LBE (MAT 159)	20	84375	44	1	19739924	1.0981
	10	675000	656	1	154731862	1.546
ALE (MAT 72)	20	301125	1088	1	144212322	9.408
	10	2409000	16189	1	1085100719	9.3553
ALE (MAT 159)	20	301125	754	1	144590961	3.1328
	10	2409000	13225	1	1088117076	2.4051
SPH (MAT 72)	20	116375	14218	3	47742353	7.01
	10	725000	53159	3	295957665	2.805
SPH (MAT 159)	20	116375	633	3	42257517	0.95
	10	725000	11185	3	252073278	0.1731
Teoretický maximální přetlak					Denkstein [6]	8.44
					Korenev [6]	8.93

2.1 Metoda Load blast enhanced

V tomto modelu je výbušnina nahrazena náhradním zatížením, které působí na kontaktní plochu panelu. Zatížení je zadáno pomocí příkazu *LOAD_BLAST_ENHANCED (LBE), ve kterém byl zadán hmotnostní ekvivalent TNT výbušniny a pozice detonace. Tato metoda není doporučena pro simulaci kontaktního výbuchu, ale vzhledem k nízké náročnosti na vstupní údaje a výpočetní techniku byla použita pro porovnání s ostatními metodami [4].



Obr. 3. Metoda LBE; čas 1 ms; plastické přetvoření kontaktního povrchu



Obr. 4. Metoda LBE; čas 1 ms; plastické přetvoření odvráceného povrchu

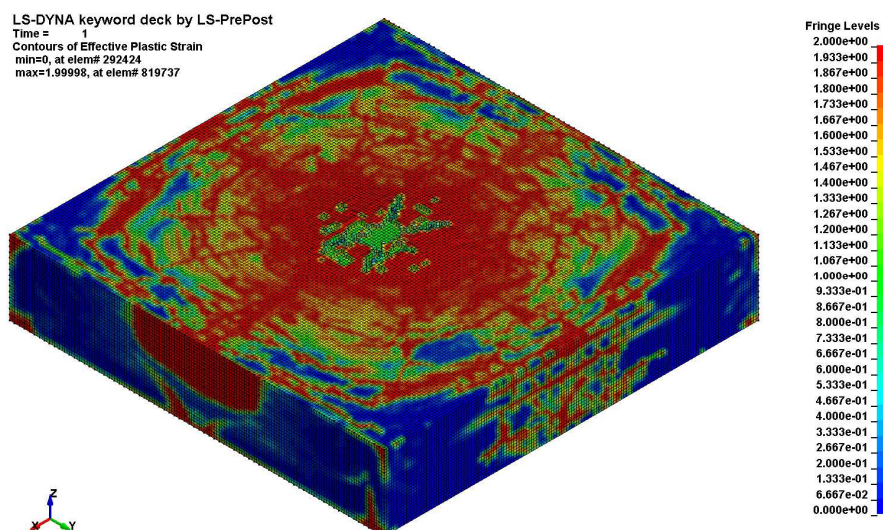
Z výše uvedených plastických přetvoření kontaktního (obr. 3) a odvráceného (obr. 4) povrchu, je patrné, že metoda relativně vhodně postihuje poškození kontaktního povrchu, na kterém je možné vidět náznak vytvoření kráteru vzniklém působením přetlakové vlny a dále radiální síť větších trhlin okolo vzniklého kráteru. Povrchu, od kterého se odráží část tlakové vlny zpět do panelu a působí zde tahové napětí, je zplaztizovaný v rozshau cca 90%. Tento výsledek není v souladu s výsledky provedených experimentů a je značně nadsazený.



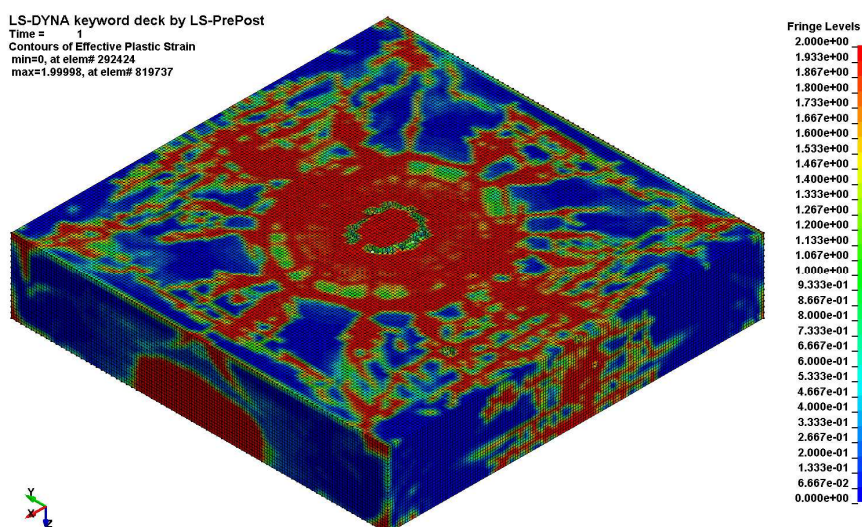
2.2 Metoda smoothed particle hydrodynamics

U metody využívající princip SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH) je výbušnina modelována pomocí částic, které jsou svázány stavovou rovnicí. Výbušnině je dále stanovena hustota materiálu, počáteční bod detonace. Zatížení výbuchem je do panelu přeneseno přes interakci letících částic s panelem [5]. Tento princip částečně zachovává jednoduchost modelu s využitím LBE, ve kterém není nutné modelovat okolní prostředí pro šíření tlakové vlny. Nevýhodou metody se ukázala značná citlivost na počet částic na určitý objem prostoru a také problém s pronikáním některých letících částic do panelu bez následné interakce mezi částicemi a zkoumaným vzorkem. Při velké hustotě částic pak často dochází k nestabilitě a následnému pádu výpočtu.

Výsledky metody SPH ukazují větší plně zplastizovanou plochu panelu na kontaktním (obr. 5) povrchu než předcházející metoda. Okolo této plochy vznikají trhliny v kružnicových tvarech. Dolní povrch panelu (obr. 6) je plně zplastizovaný z cca 30%. Ve středu modelovaného panelu vzniká plně zplastizovaná plocha, ze které se šíří radiální trhliny do všech směrů. Tento výsledek odpovídá výsledkům získaným z provedených experimentů.



Obr. 5. Metoda SPH; čas 1 ms; plastické přetvoření kontaktního povrchu



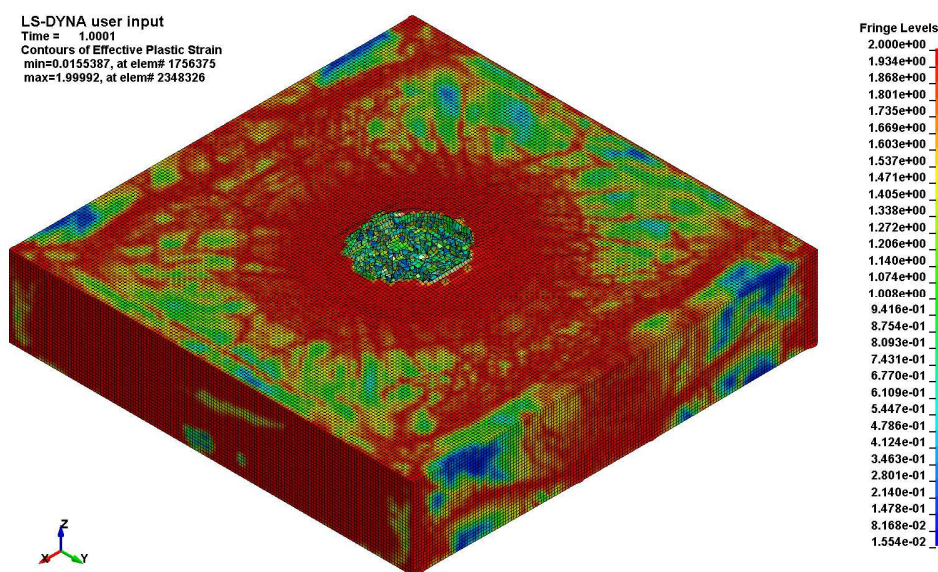
Obr. 6. Metoda LBE; čas 1 ms; plastické přetvoření odvráceného povrchu



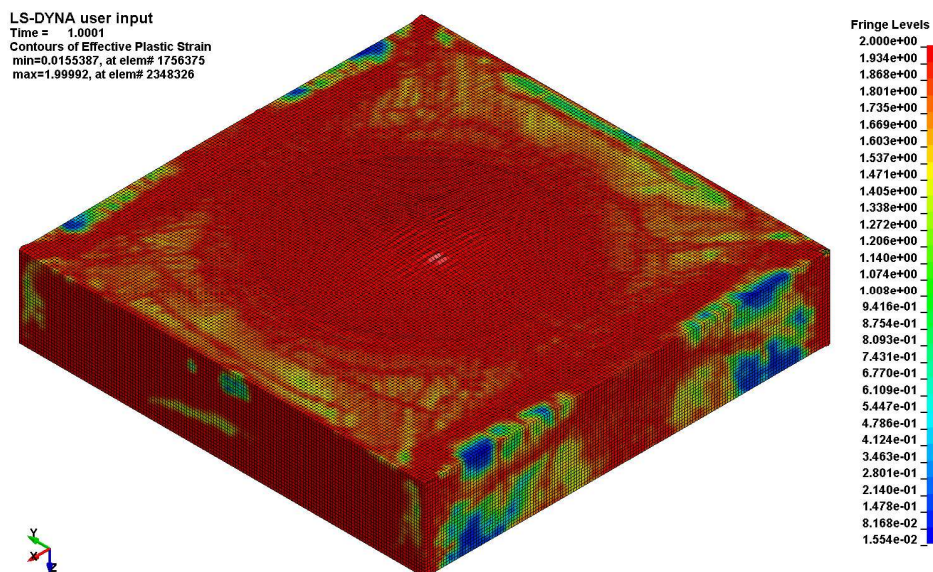
2.3 Arbitrary Lagrangian-Eulerian metoda

V případě metody založené na kombinaci prvků s Lagrangianskou a Eulerovskou definicí (ALE) je na rozdíl od předchozích metod potřeba vymodelovat jak panel, tak okolní prostředí, kterým se tlaková vlna může šířit. Obě sítě tak jsou položeny přes sebe. Prvky panelu jsou definovány Lagrangiovským principem a chování panelu odpovídá více FEM metodě. Vzduch a výbušnina jsou definovány Eulerovským principem a je umožněna změna velikosti jednotlivých konečných prvků a jejich pohyb v rámci původně definované sítě. Takto definovaný model klade značné nároky na velikost vstupního souboru a výpočetní čas. V případě volby menšího kroku sítě než zvolených 10 mm byla vyčerpána veškerá paměť počítače už při tvorbě modelu. Dále se jako kritické ukázalo správné nastavení interakce mezi Lagrangiovskými a Eulerovskými prvky, které je zajištěno pomocí příkazu `*CONSTRAINED_LAGRANGIAN_IN_SOLID`. V případě špatného nastavení této funkce dochází k průniku prvků výbušniny do panelu a chybnému chování celého modelu, zvláště pak prvků panelu.

Při použití ALE metody dochází ke značnému zplaztizování obou povrchů. Na kontaktním povrchu (obr. 7) dochází v porovnání s ostatními metodami k největší erozi elementů. Okolo vzniklého kráteru se objevuje kruh, ve kterém je panel plně zplaztizován a ze kterého se šíří radiálně menší a kratší trhlinky. Plochy mezi trhlinami jsou zplaztizovány z cca 50%. Odvrácený povrch (obr. 8) je zcela zplaztizován v cca 95% plochy a není možné sledovat vznik trhlin v panelu.



Obr. 7. Metoda ALE; čas 1 ms; plastické přetvoření kontaktního povrchu



Obr. 8. Metoda ALE; čas 1 ms; plastické přetvoření odvráceného povrchu

3. Závěr

Aplikace a srovnání více výpočetních metod pro numerické modelování chování betonového panelu při zatížení kontaktním výbuchem se ukázalo jako velmi vhodné. Metoda LBE, která je pro zadání velmi jednoduchá, se nejeví jako vhodná pro simulaci kontaktního výbuchu. Výsledky metody jsou uspokojivé na kontaktním povrchu panelu, ale naprosto nedostačující na odvráceném povrchu. S použitím této metody pro simulaci kontaktního výbuchu se dále nepočítá vzhledem k nemožnosti ověření platnosti empirických vztahů pro kontaktní výbuch.

Simulace exploze pomocí částic umožňuje snížit nároky na využitou paměť PC při výpočtu a odpadá modelování okolního prostředí. Metoda se ukázala velmi citlivá na správné nastavení hustoty částic. Při větší hustotě dochází k nestabilitě výpočtu. Pro úspěšný výpočet bylo potřeba použít výpočet s využitím tří jader. Výsledky metody nejlépe vystihují výsledky experimentu jak na kontaktní straně panelu, tak i na jeho odvrácené straně.

Úspěšnost použití ALE metody závisí na správném nastavení interakčního mechanismu mezi Lagrangionovskými a Eulerovskými prvky. Metoda je ze srovnávaných metod nejnáročnější na využitou paměť počítače. ALE metoda vykazuje relativně dobré výsledky na kontaktním povrchu panelu, na kterém je možné sledovat vznik a šíření trhlin. Výsledky na odvráceném povrchu neodpovídají výsledkům experimentu.

Z porovnání dvou materiálových modelů vhodných pro popis chování betonových prvků se ukázal materiálový model MAT_72_REL3 jako vhodnější. Tento materiál je možné použít pro betony vyšších pevností (betony s pevností vyšší než 90 M) než dovoluje materiálový model MAT_159. Dále je v materiálovém modelu MAT_72_REL3 umožněno uživatelské zadání podmínky eroze materiálu a křivky zvýšení pevnosti materiálu v závislosti na rychlosti změny přetvoření.

Zkoumáním vlivu velikosti prvků na výsledné chování panelu bylo zjištěno, že modely s menším jemností sítě přesněji popisují chování prvku. Zjemňování sítě však naráží na možnosti výpočetní techniky.



Porovnáním výpočetních metod a jejich úspěšným nastavením je umožněno zkoumání následujících jevů a jejich vlivů na výbuchovou odolnost zkoumaných prvků:

- Zjištění vlivů velikosti sítě na výsledky
- Vliv rychlosti zatížení na okamžitou pevnost betonu a její nárůst
- Zavedení materiálového modelu odpovídající drátkobetonu a zavedení výztuže do modelu
- Numerické namodelování výbuchového experimentu

Poděkování

Tento článek byl vytvořen v rámci podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, číslo projektu SGS17/045/OHK1/1T/11.

Zdroje

- [1] FOGLAR, Marek, Radek HÁJEK, Radek ŠTEFAN a Jiří STÖHR. *Vyšetřování vlastností cementových kompozitů vystavených působení extrémních zatížení: experimenty, modelování, technologie*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05892-3.
- [2] HILDING, Daniel. *Methods for modelling Air blast on structures in LS-Dyna* [online]. In: . Gothendung, Sweden, 2016, s. 78 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: https://www.dynamore.se/en/resources/papers/DmN_UsersC_2016/papers/methods-for-modelling-air-blast-on-structures-in-ls-dyna_hilding
- [3] LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC). *LS-DYNA® KEYWORD USER'S MANUAL: VOLUME II Material Models* [online]. 2002 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-8.0-vol-ii>
- [4] TABATABAEI, Hahra S. a Jeffery S. VOLZ. A Comparison between Three Different Blast Methods in LS-DYNA® :: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. In: *12th International LS-DYNA® Users Conference: Blast/Impact(3)* [online]. s. 10 [cit. 2017-04-09].
- [5] LI, Jun, Chengqing WU a Hong HAO. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. In: *Engineering Structures: Blast/Impact(3)* [online]. 2015, **102**, s. 395-408 [cit. 2017-04-09]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.032. ISSN 01410296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029615005313>
- [6] MAKOVIČKA, Daniel, Břetislav JANOVSKÝ a Milan ČERNÍN. *Průručka protivýbuchové ochrany staveb*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04090-4.