Biomechanika zatížení hlavy dítěte při třesení nebo pádu

Biomechanics of Loading the Child's Head During Shaking or Falling

JIŘÍ STRAUS¹

Abstrakt

Shaken baby syndrome je nejčastěji způsoben prudkým třesením a cloumáním s kojencem nebo malým dítětem, přičemž nezáleží na tom, za jakou část těla dítěte je cloumáno a třeseno, za nohy, ruce, hrudník či ramena. Prudké třesení může mít za následek poškození mozku (které vede až k mentální retardaci, poruchám řeči nebo učení), paralýzu, epileptické záchvaty, ztrátu sluchu nebo dokonce smrt. Může také způsobit krvácení do mozku nebo v okolí očí s následkem slepoty. V příspěvku jsou uvedeny výsledky experimentů, které byly provedeny s biomechanickým modelem kojence. Autor uvádí hodnoty zrychlení hlavy, které dosáhli probandi průměrné výkonnosti. Potvrdila se hypotéza, že třesením v krátkém časovém úseku po dobu několika sekund je člověk schopen způsobit přetížení, které dosahuje kritické hranice pro přežití při vnitřním poranění hlavy poškodit dítě.

Klíčová slova

biomechanika, Shaken baby syndrome, třesení, decelerace

Abstract

Shaken baby syndrome is mostly caused by forceful shaking and plucking at a stuckling baby or a young child, there is not important which body part is shaken by – legs, arms, chest or shoulders. Plucking can provoke brain damage (which is followed by mental retardation, learning and speaking defect), paralysis, epileptic fit, hearing loss or death. It can also provoke encephalorrhagia or in eyes surrounding blindness. There are mentioned results of experiments which were made with a stuckling baby biomechanical model. The author shows in values of head acceleration which reached average efficiency. It was attested a hypothesis that a man is able to provoke overfreight which reaches critical border for surviving in case of internal head injury during only a few second shaking.

Key words

biomechanics, Shaken baby syndrome, shaking, deceleration

DOI

<http://dx.doi.org/10.37355/fvpk-2021/1-01>

¹ prof. PhDr. Jiří Straus, DrSc., Katedra kriminalistiky a forenzních disciplín, Vysoká škola finanční a správní, a.s., Praha

Úvod

V kriminalistické znalecké praxi se někdy řeší problém, zda kritické zatížení hlavy a mozku bylo způsobeno třesením, tzv. Shaken baby syndrome, nebo pádem z relativně malé výšky. V případech traumatického poranění mozku u dětí může být obtížné rozlišovat mezi fyzickým týráním a náhodným pádem dítěte z malé výšky. Z přehledu literatury lze konstatovat, že pády z méně než 1,5 m vedou jen v několika případech k těžkým poraněním mozku. Syndrom třeseného dítěte není zatím velice známý, přesto patří mezi nejhrubší formu násilí na dětech. Jedná se o zdravotní potíže označované jako syndrom třeseného dítěte – angl. Shaken baby syndrome (SBS) – bývají způsobeny prudkým třesením a cloumáním s kojencem nebo malým dítětem, přičemž nezáleží na tom, za jakou část těla dítěte je cloumáno a třeseno – zda za nohy, ruce, hrudník či ramena.

Dětská hlava a krk jsou mimořádně zranitelné právě proto, že hlava je tak velká a krční svaly jsou stále ještě slabé. Syndrom třeseného dítěte se vyskytuje u dětí v jakémkoliv věku, ale nejčastěji u dětí mladších jednoho roku. Nejmladší dítě, u kterého byl syndrom diagnostikován, byl osmidenní novorozenec. Dětský mozek a cévy jsou velmi křehké a třesení, škubání či prudké trhání způsobí hyperflexi nebo hyperextenzi krčních svalů s vážnými následky. Prudké třesení může mít za následek poškození mozku (které vede až k mentální retardaci, poruchám řeči nebo učení), paralýzu, epileptické záchvaty, ztrátu sluchu nebo dokonce smrt. Může také způsobit krvácení do mozku nebo v okolí očí s následkem slepoty.

Syndrom třesení dítětem

Syndrom třeseného dítěte – angl. Shaken baby syndrome (SBS) – bývá způsoben prudkým třesením a cloumáním s kojencem nebo malým dítětem. Dětská hlava a krk jsou mimořádně zranitelné právě proto, že hlava je tak velká a krční svaly jsou stále ještě slabé. Syndrom třeseného dítěte se vyskytuje nejčastěji u dětí mladších jednoho roku.²

2 LLOYD, J., E. N. WILLEY, J. G. GALAZNIK, W. E. LEE and S. E. LUTTNER. Biomechanical Evaluation of Head Kinematics During Infant Shaking Versus Pediatric Activities of Daily Living. *Journal of Forensic Biomechanics*, Vol. 2 (2011).

Obr. 1: Třesení s fyzikálním modelem 10měsíčního dítěte

Z hlediska biomechanického namáhání jsou důležité dvě zásadní hodnoty, a to přetížení mozku (decelerace hlavy vyjádřená v násobcích g , tíhová konstanta $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$) a čas zátěže (s). Na obr. 2 je uvedeno schéma zatížení hlavy třesením.³

Při třesení dochází k rotaci hlavy kolem bodu O , velikost smykových sil je závislá na délce poloměru r , podle biomechanických podkladů lze stanovit $r = 10 \text{ cm}$. Pro $a = 9g$ je maximální rychlost na horním okraji hlavy (na temeni hlavy) $v = 8,83 \text{ m.s}^{-1}$. Rychlost kmitání hlavy má charakter sinusového průběhu. V místě extrému je $v = 0$. Rychlost pohybu se zvýší na okraji mozkové kůry a vzniknou nebezpečné smykové síly mezi mozkem a lebkou, ty mají za následek poškození tepen a následné nitrolební krvácení.

Obr. 2: Shaken baby syndrome

3 STRAUS, J. Příspěvek k biomechanickému hodnocení třesení dítěte – Shaken baby syndrome. Pohybové ústrojí. 17, 2010, č. 1–2, s. 68–76. ISSN 1212-4575.

Z dosud zjištěných údajů vyplývá, že k syndromu třeseného dítěte („Shaken baby syndrome“) dochází převážně v situaci, kdy osoba držící v rukou dítě s ním provádí předozadní pohyb. Tím v důsledku nedostatečně vyvinutých týlních svalů dítěte, rychlé akceleraci předozadního pohybu ze strany držící osoby, dochází k pozdější akceleraci, dochází ke zrychlení hlavy dítěte při zpětném pohybu. Působením předozadního pohybu a odstředivých sil vzniká zvýšený nitrolební tlak a v důsledku pohybu mozkové hmoty uvnitř hlavy dítěte začnou působit i smykové síly. Z výše uvedených důvodů byl pro modelovou situaci zvolen právě tento způsob pohybu dítěte.

Pro studium třesení dítětem bylo v literatuře popsáno několik studií, které vycházely jednak z fyzikálních modelů nebo z modelů matematických. Ojedinelé a vzácné studie byly provedeny se zvířaty nebo mrtvými kojenci.⁴ Výsledky jsou využitelné pro predikci prahových hodnot pro vznik smrtelných následků.⁵

Ve studiích, které pracovaly s fyzikálními modely dítěte, byly získány prahové hodnoty zatížení mozku v komparaci s variantou úderu do hlavy. Velmi často se v těchto studiích řeší otázka, zda bylo zranění dítěte nebo i smrt způsobena třesením (SBS) nebo pádem dítěte nebo úderem hlavou o pevnou překážku.^{6,7}

Tato kritéria jsou stanovena jednak hodnotou úhlového zrychlení hlavy a hodnotou lineárního zrychlení hlavy v násobcích g.⁸ Kritérium smrtelného zranění je možné také vyjádřit hodnotou HIC, která vyjadřuje pravděpodobnost smrtelného následku.^{9,10}

Predikce mezní síly působící na krk dítěte v průběhu SBS na základě několika studií na zvířatech.¹¹ Frekvence třesení dítětem byla 2–5 Hz po dobu 3–5 sekund.¹² V literatuře bylo popsáno strojové třesení s figurínou dítěte při frekvenci v intervalu 1,5–3,5 Hz.¹³

4 ZANDWIJK van, J. P., M. E. M. VESTER, R. A. BILO et al. Modeling of inflicted head injury by shaking trauma in children: what can we learn? *Forensic Sci Med Pathol* 15, 423–436.

5 MORISON, C. N. The dynamics of shaken baby syndrome. Birmingham: University of Birmingham; 2002

6 CORY, C. Z. and M. D. JONES. Can shaking alone cause fatal brain injury? A biomechanical assessment of the Duhaime shaken baby syndrome model. *Med Sci Law*. 2003, 43:317–33.

7 YAMAZAKI, J., M. YOSHIDA and H. MIZUNUMA. Experimental analyses of the retinal and subretinal haemorrhages accompanied by shaken baby syndrome/abusive head trauma using a dummy doll. *Injury*. 2014, 45:1196–206.

8 JENNY, C. A., G. BERTOCCI, T. FUKUDA, N. RANGARAJAN and T. SHAMS. Biomechanical response of the infant head to shaking: An experimental investigation. *J Neurotrauma*. 2017, 34:1579–88. BONDY M., W. ALTENHOF, X. CHEN, A. SNOWDON and B. VRKLJAN. Development of a finite element/multi-body model of a newborn infant for restraint analysis and design. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2014, 17:149–62.

9 CORY, C. Z. and M. D. JONES. Can shaking alone cause fatal brain injury? A biomechanical assessment of the Duhaime shaken baby syndrome model. *Med Sci Law*. 2003, 43:317–33.

10 LLOYD, J., E. N. WILLEY, J. G. GALAZNIK, W. E. LEE and S. E. LUTTNER. Biomechanical Evaluation of Head Kinematics During Infant Shaking Versus Pediatric Activities of Daily Living. *Journal of Forensic Biomechanics*, Vol. 2, 2011, 2:1–9.

11 BANDAK, FA. Shaken baby syndrome: a biomechanics analysis of injury mechanisms. *Forensic Sci Int*. 2005;151:71–9.

12 CHENG, J., I. C. HOWARD and M. RENNISON. Study of an infant brain subjected to periodic motion via a custom experimental apparatus design and finite element modelling. *J Biomech*. 2010;43:2887–96.

13 KOIZUMI, T., N. TSUJIUCHI, K. HARA and Y. MIYAZAKI. Dynamic response and damage estimation of

Testování ukázalo, že je možné generovat jen asi 10–15 g zrychlení mozku při nejsilnějším třesení po dobu několika sekund.¹⁴ Při volném pádu byla zjištěna hodnota 16,8g. Zaznamenaná doba nárazu byla 20 ms, respektive 26 ms. Z přehledu literatury lze konstatovat, že pády z méně než 1,5 m vedou jen v několika případech k těžkým poraněním mozku¹⁵. Děti, které doma zažily pád, zřídka vykazují vážná zranění, ale jen drobná intrakraniální poranění bez neurologických deficitů.

Kritérium pro smrtelné následky byly zjištěny na fyzikálních modelech $HIC > 840$ pro děti a $HIC_{15} > 390$ pro kojence. Pro prasknutí přemostovací žíly je $\alpha > 10.000 \text{ rad/s}^2$. Doba přetížení mozku je v delším časovém intervalu než při jednorázovém pádu. Přetržení přemostovacích žil způsobují pohyby mozku vpřed a vzad po relativně delší dobu, 1,5 s.

Stanovit velikost síly, která je nutná pro vznik poškození mozku SBS, je velmi obtížné zejména proto, že je nesnadné měřit vyvinutou sílu. V tomto směru provedl Bandak¹⁶ řadu experimentů na mrtvolách paviánů, koz a s mrtvolami kojenců, velikost této síly zjistit pro kojence 445 N.

Následující tabulka uvádí hodnoty kinematických parametrů zjištěné při experimenty na mechanických modelech pro SBS

Odkaz	Špičková úhlová rychlost ω (rad/s)	Špičkové úhlové zrychlení α (rad/s ²)	Maximální lineární zrychlení (m/s ²)	Poznámky
Duhaime et al. (1987)	61	1 138	91	Rozsah je určen pro různé typy krků.
			56–136	
Cory & Jones (2003)	61 (průměr: 51)	10 216 (průměr: 8693)	1 736 (průměr: 1 488)	Největší hodnoty pro gravitační asistované třepání. Průměr se zprůměruje v různých vyzkoušených kombinacích parametrů.

infant brain for vibration. In: ALLEMANG, R. et al., editors. *Special topics in structural dynamics, volume 6. Proceedings of the 31st international modal analysis conference on structural dynamics*. Garden Grove, 2013, pp. 11–18.

14 GLOWINSKI, S., S. MAJDANIK, A. GLOWINSKA and E. MAJDANIK. *Trauma in a shaken infant? A case study. Aggression and Violent Behavior, Volume 56, January–February 2021.*

15 OEHMICHEN, M., C. MEISSNER and K.-S. SATERNUS. *Fall or Shaken: Traumatic Brain Injury in Children Caused by Falls or Abuse at Home – A Review on Biomechanics and Diagnosis. Neuropediatrics 2005, 36(4): 240–245.*

16 BANDAK, F. A. *Shaken baby syndrome: a biomechanics analysis of injury mechanisms. Forensic Sci Int. 2005;151:71–9.*

Lloyd et al. (2011)	35	1 587	74	Hodnoty pro dva různé modely.
	25	1 068	97	
Cirovic et al. (2012)	25	650	45	Hodnoty pro testovací figurínu P3/4 a proprietární panenku.
	40	1 180	76	
Yamazaki et al. (2014)			46–60	Rozsah je určen pro různé styly třepání.
Jenny et al. (2017)	80–106	9 613–13 260		Rozsahy jsou špičkové hodnoty pro různé pokusy.
Bondy et al. (2014)	45	18 567		Hodnoty pro dvě různé tuhosti krku.
	39	21 205		
Jones et al. (2014)	17	1 133	96 80–350	Rozsah je určen pro různé vlastnosti tuhosti krku.
Lintern et al. (2015)	~20		200–250	Jehněčí model.

Vlastní experimenty

Pro tuto modelovou situaci byl zapůjčen firmou HELAGO-CZ s.r.o. simulátor určený pro výukové účely o Shaken baby syndromu od výrobce Realityworks. Při měření modelové situace jsme na figuríně zvýraznili pevné body lepicí páskou. Pro záznam pohybu byla použita rychlostní videokamera s frekvencí snímání 250 snímků/sekundu.

Figurína byla ve velikosti přibližně šestiměsíčního kojence vybavena akustickým simulátorem dětského pláče a uvnitř hlavy snímači spojené s LED diodami. Ty po dosažení určité hraniční meze počaly impulzně červeně svítit a signalizovaly tak kritickou hranici vážných poškození oblastí mozku. Zároveň ustal i akustický simulátor pláče.

Figurína pro měření měla v sobě zabudovaná čidla, která simulovala dětský pláč, a při dosažení kritického zatížení mozku došlo ke světelné reakci na hlavě, hlava začala „blikat“. Reakce figuríny (simulátoru) se zkoušela i při intenzivním třesení (subjektivně velkým úsilím) a z prvotních zjištění vyplynulo, že postačoval kratší čas třesení (řádově několik sekund) a méně vynaloženého úsilí k tomu, aby uvnitř zabudovaná čidla reagovala, než tomu bylo u třesení figurínou předozadním pohybem. Dále při chování záleželo na postavení hlavičky dítěte. Pokud byla hlavička směrem od figuranta do prostoru, bylo zapotřebí intenzivnějšího třesení než v případech, kdy hlavička figuríny směřovala vzhůru k figurantovi.

Pro druhé měření modelové situace jsme zvolili uchycení akcelerometru na hlavě figuríny, který snímal okamžité zrychlení hlavy dítěte. Záznam pohybu byl zaznamenán jak na jednu videokameru s frekvencí 25 snímků/sekundu, tak dvěma videokamerami s frekvencí snímání 250 snímků/sekundu.

Obr. 3: Třesení modelem dítěte, zapůjčený firmou HELAGO-CZ s.r.o., simulátor určený pro výukové účely o Shaken baby syndromu od výrobce Realityworks

V následujícím grafu je vyhodnocení naměřených hodnot a grafické zpracování průběhu jednotlivých modelových situací, které prezentují průběh decentrace hlavy.

Obr. 4: Průběh zrychlení hlavy v čase, plynulé třesení dítětem

Někteří figuranti byli schopni i ve velmi krátkém čase vyvinout přetížení, které dosahuje či dokonce přesahuje hranici pro přežití při vnitřním poranění hlavy. Je třeba si povšimnout i délky třesení s dítětem. Délka třesení byla určována tím, kdy simulační zařízení pláče

figuríny ustalo a zároveň se rozsvítily LED diody znázorňující oblasti poškození. Nejdelší doba třesení trvala 2,5 s.

Měřením na souboru osob se prokázalo, že lze dosáhnout kritické hodnoty zatížení organismu, nitrolební krvácení dítěte, velmi snadno. Všichni figuranti byli schopni vytvořit kritickou hranici decelerace hlavy. Třesením v krátkém časovém úseku po dobu několika sekund je člověk schopen způsobit přetížení, které dosahuje kritické hranice pro přežití při vnitřním poranění hlavy poškodit dítě.

Maximální hodnota přetížení hlavy v krajní poloze byla zjištěna hodnota zrychlení hlavy 30 g, a to pro záporné i kladné hodnoty, pro obě krajní polohy hlavy. Minimální hodnota byla zjištěna 9 g. Pokud uvažují absolutní hodnotu zjištěných maxim zrychlení, pak průměrná hodnota při měření byla zjištěna 19 g.

Při překročení hodnoty 12 g je podle literatury možné způsobit nejen vážnou újmu na zdraví, ale i smrt.^{17, 18} Toto však bude velice individuální, neboť třesení může být ovlivněno nejrozličnějšími faktory, jako např. fyzické dispozice osoby třesoucí, zdravotní stav dítěte, jeho stáří a fyzická konstrukce nebo o jakou národnost se jedná. U dětí různých národností jsou známé rozdíly např. v období, kdy jsou schopny ovládat krční svalstvo. Potvrdily se však již dříve známé poznatky, že třesení dítěte způsobí enormní zvýšení tlaku mozku na vnitřní stranu lebky a vznikají značné smykové síly mezi mozkem a lebeční kostí. Takto může vzniknout subdurální krvácení, edém mozku nebo zvýšení intrakraniálního tlaku. Vnitřní tlak způsobený tímto třesením také působí na zadní stranu sítnice oka, ve kterém může dojít k retinálním hemoragiím, a tím poškození zraku dítěte. Při silné akceleraci a následné deceleraci v důsledku nevyvinutých krčních svalů může dojít k přerušení impulzů jejich nervových výběžků (axonů) a následné zástavě srdce.

Zrychlení hlavy a úroveň rychlosti běžně uváděné pro SBS generují síly, které jsou příliš velké na to, aby krk dítěte vydržel bez zranění. Rychlost hlavy při ručním třepání člověkem je stejného řádu jako rychlost hlavy při volném pádu z výšky přibližně 1 m.¹⁹

Pád dítěte z malé výšky

Byla provedena studie, ve které se zkoumalo zatížení organismu na modelu 12měsíčního dítěte.²⁰ Fyzikální model Child Restraint Air Bag Interaction (CRABI) 12-month-old ATD (First Technology Safety Systems, Plymouth, MI) byl podroben pádu ze tří různých výšek

17 THOMPSON, A. K., G. BERTOCCI and M. C. PIERCE. Assessment of Head Injury Risk Associated With Feet-First Free Falls in 12-Month-Old Children Using an Anthropomorphic Test Device. *J Trauma*. 2009, 66:1019–1029.

18 ORIENT, J. M. Reflection on „Shaken baby syndrome“: A Case Report. *Journal of American Physicians and Surgeons*. Vol. 10, No 2, 2005, pp. 45–50.

19 GLOWINSKI, S., S. MAJDANIK, A. GLOWINSKA and E. MAJDANIK. Trauma in a shaken infant? A case study. *Aggression and Violent Behavior*, Volume 56, January–February 2021.

20 THOMPSON, A. K., G. BERTOCCI and M. C. PIERCE. Assessment of Head Injury Risk Associated With Feet-First Free Falls in 12-Month-Old Children Using an Anthropomorphic Test Device. *J Trauma*. 2009, 66:1019–1029.

(46 cm, 69 cm a 119 cm – 18 palců, 27 palců a 47 palců), na pět různých typů povrchů (dřevo, linoleum na dřevěném podkladu, linoleum na betonovém podkladu, beton, hřiště) Měřilo se lineární zrychlení při dopadu a úhlové zrychlení hlavy. Maximální hodnota zrychlení hlavy při dopadu byla v průměru 52,2 g. Hodnoty HIC15 byly ve všech případech pádů pod kritickou hranicí poškození.

Obr. 5: Fyzikální model dítěte výška 75 cm, hmotnost 10 kg (Thompson A. K., G. Bertocci a M. C. Pierce, 2009)

Maximální úhlové zrychlení hlavy bylo $4\,246\text{ rad/s}^2$. Doba impaktu byla zjištěna v intervalu 12,1 až 27,8 ms. Experimenty prokázaly, že riziko vážného poranění hlavy u 12měsíčního dítěte je ve všech testovaných variantách hluboko pod kritickou hranicí.²¹

²¹ Tamtéž.

Obr. 6: Pád fyzikálního modelu dítěte z výšky 46 cm, 69 cm a 119 cm

Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech.

Obr. 7: Maximální lineární zrychlení hlavy při dopadu na různý povrch (Thompson A. K., G. Bertocci a M. C. Pierce, 2009)

Obr. 8: Hodnoty HIC15 při dopadu hlavy z různé výšky na různé podklady (Thompson A. K., G. Bertocci a M. C. Pierce, 2009)

Obr. 9: Maximální předozadní úhlové zrychlení hlavy z různé výšky na různé podklady (Thompson A. K., G. Bertocci a M. C. Pierce, 2009)

Obr. 10: Doba nárazu hlavy z různé výšky na různé podklady (Thompson A. K., G. Bertocci a M. C. Pierce, 2009)

Závěr

Měření na souboru osob se prokázalo, že lze dosáhnout kritické hodnoty zatížení organismu, nitrolebního krvácení dítěte, velmi snadno. Všichni figuranti byli schopni vytvořit kritickou hranici decelerace hlavy. Třesením v krátkém časovém úseku po dobu několika sekund je člověk schopen způsobit přetížení, které dosahuje kritické hranice pro přežití při vnitřním poranění hlavy poškodit dítě. Zrychlení hlavy a úroveň rychlosti běžně uváděné pro SBS generují síly, které jsou příliš velké na to, aby krk dítěte vydržel bez zranění. Rychlost hlavy při ručním třepání člověkem je stejného řádu jako rychlost hlavy při volném pádu z výšky přibližně 1 m.

Maximální hodnota přetížení hlavy v krajní poloze byla zjištěna hodnota zrychlení hlavy 30 g, a to pro záporné i kladné hodnoty, pro obě krajní polohy hlavy. Minimální hodnota byla zjištěna 9 g. Pokud uvažujeme absolutní hodnotu zjištěných maxim zrychlení, pak průměrná hodnota při měření byla zjištěna 19 g.

Při překročení hodnoty 12 g je podle literatury možné způsobit nejen vážnou újmu na zdraví, ale i smrt. Toto však bude velice individuální, neboť třesení může být ovlivněno nejrozličnějšími faktory, jako např. fyzické dispozice osoby třesoucí, zdravotní stav dítěte, jeho stáří a fyzická konstrukce nebo o jakou národnost se jedná. U dětí různých národností jsou známy rozdíly např. v období, kdy jsou schopny ovládat krční svalstvo. Potvrdily se však již dříve známé poznatky, že třesení dítěte způsobí enormní zvýšení tlaku mozku na vnitřní stranu lebky a vznikají značné smykové síly mezi mozkem a lebeční kostí. Takto může vzniknout subdurální krvácení, edém mozku nebo zvýšení intrakraniálního tlaku.

Vnitřní tlak způsobený tímto třesením také působí na zadní stranu sítnice oka, ve kterém může dojít k retinálním hemoragiím, a tím poškození zraku dítěte. Při silné akceleraci a následné deceleraci v důsledku nevyvinutých krčních svalů může dojít k přerušení impulsů jejich nervových výběžků (axonů) a následné zástavě srdce.

Použitá literatura

BONDY, M., W. ALTENHOF, X. CHEN, A. SNOWDON and B. VRKLJAN. Development of a finite element/multi-body model of a newborn infant for restraint analysis and design. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2014, 17:149–62.

CASE, M., M. GRAHAM, T. HANDY, J. JENTZEN, J. MONTELEONE. The National Association of Medical Examiners Ad Hoc Committee on Shaken Baby Syndrome. Position paper on fatal abusive head injuries in infants and young children. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology.* Vol. 22, No 2, 2001, pp. 112–122.

CIROVIC, S., M. FREDDOLINI, R. GOODWIN and D. ZIMAREV. Shaken mannequin experiments: Head motion pattern and its potential effect on blood pressure. *J Forensic Biomech.* 2012, 3:1–4.

CORY, C. Z. and M. D. JONES. Can shaking alone cause fatal brain injury? A biomechanical assessment of the Duhaime shaken baby syndrome model. *Med Sci Law.* 2003, 43:317–33.

DUHAIME, A. C., T. A. GENNARELLI, L. E. THIBAUT, D. A. BRUCE, S. S. MARGULIES and R. ISER. The shaken baby syndrome. A clinical, pathological, and biomechanical study. *J Neurosurg.* 1987, 66:409–15.

GLOWINSKI, S., S. MAJDANIK, A. GLOWINSKA and E. MAJDANIK. Trauma in a shaken infant? A case study. *Aggression and Violent Behavior.* Volume 56, January–February 2021.

JENNY, C. A., G. BERTOCCI, T. FUKUDA, N. RANGARAJAN and T. SHAMS. Biomechanical response of the infant head to shaking: An experimental investigation. *J Neurotrauma.* 2017, 34:1579–88.

JONES, M. D., P. S. MARTIN, J. M. WILLIAMS, A. M. KEMP and P. THEOBALD. Development of a computational biomechanical infant model for the investigation of infant head injury by shaking. *Med Sci Law.* 2014, 55:291–9.

KOIZUMI, T., N. TSUJIUCHI, K. HARA and Y. MIYAZAKI. Dynamic response and damage estimation of infant brain for vibration. In: ALLEMANG R. et al., editors. *Special topics in structural dynamics, volume 6.* Proceedings of the 31st international modal analysis conference on structural dynamics. Garden Grove, 2013, pp. 11–18.

LINTERN, T. O., N. T. PUHULWELLE GAMAGE, F. H. BLOOMFIELD, P. KELLY, M. C. FINCH, A. J. TABERNER et al. Head kinematics during shaking associated with abusive head trauma. *J Biomech.* 2015, 48, 3123–7.

LLOYD, J., E. N. WILLEY, J. G. GALAZNIK, W. E. LEE and S. E. LUTTNER. Biomechanical Evaluation of Head Kinematics During Infant Shaking Versus Pediatric Activities of Daily Living. *Journal of Forensic Biomechanics.* Vol. 2 (2011).

OEHMICHEN, M., C. MEISSNER and K.-S. SATERNUS. Fall or Shaken: Traumatic Brain Injury in Children Caused by Falls or Abuse at Home – A Review on Biomechanics and Diagnosis. *Neuropediatrics.* 2005, 36(4): 240–245.

ORIENT, J. M. Reflection on „Shaken baby syndrome“: A Case Report. *Journal of American Physicians and Surgeons*. Vol. 10, No 2, 2005, pp. 45–50.

STRAUS, J. Příspěvek k biomechanickému hodnocení třesení dítěte – Shaken baby syndrome. *Pohybové ústrojí*. 17, 2010, č. 1–2, s. 68–76. ISSN 1212-4575.

THOMPSON, A. K., G. BERTOCCI, G. and M. C. PIERCE. Assessment of Head Injury Risk Associated With Feet-First Free Falls in 12-Month-Old Children Using an Anthropomorphic Test Device. *J Trauma*. 2009, 66:1019–1029.

WOLFSON, D. R., D. S. MCNALLY, M. J. CLIFFORD and M. VLOEBERGHES. Rigid-body modelling of shaken baby syndrome. *Proc Inst Mech Eng Part H J Eng Med*. 2005, 219:63–70.

YAMAZAKI, J., M. YOSHIDA and H. MIZUNUMA. Experimental analyses of the retinal and subretinal haemorrhages accompanied by shaken baby syndrome/abusive head trauma using a dummy doll. *Injury*. 2014, 45:1196–206.

ZANDWIJK van, J. P., M. E. M. VESTER, R. A. BILO et al. Modeling of inflicted head injury by shaking trauma in children: what can we learn? *Forenzní Sci Med Pathol*. 15, 423–436.