



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Zadržný systém pro pádovou věž

Deceleration unit for a drop tower

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Bc. Elias KARNOUB

Studijní program: NLAK Letectví a kosmonautika

Studijní obor: 3906T008 Letadlová a kosmická technika

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Kučera

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Karnoub** Jméno: **Elias** Osobní číslo: **456768**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zádržný systém pro pádovou věž

Název diplomové práce anglicky:

Deceleration unit for a drop tower

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši zádržných systémů v pádových věžích. Srovnajte jejich vhodnost pro pádovou kapsli o hmotnosti 5-20 kg a rychlosti 10-25 m/s a průměru 200-300mm (+ aerodynamický kryt). Brzdné zrychlení by nemělo překročit 50g (optimálně do 30g). Orientujte se především spolehlivostí a jednoduchostí konstrukce i obsluhy. Vytvořte základní konstrukční návrh zádržného systému.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jaromír Kučera, ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jaromír Kučera
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Zadržný systém pro pádovou věž“ vypracoval(a) samostatně pod vedením Ing. Jaromíra Kučery, s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 30. 07. 2021

Bc. Elias Karnoub

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jaromírovi Kučerovi za připomínky, vedení, a ochotu vždy poradit při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za psychickou podporu.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Bc. Elias KARNOUB
Název DP:	Zádržný systém pro pádovou věž
Anglický název:	Deceleration unit for a drop tower
Rok:	2021
Studijní program:	NLAK Letectví a kosmonautika
Obor studia:	3906T008 Letadlová a kosmická technika
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí DP:	Ing. Jaromír Kučera
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	počet stran 59
	počet obrázků 48
	počet tabulek 12
	počet příloh 02
Klíčová slova:	Pádová věž, Mikrogravitace, Zádržný systém, Zapichovací hrot
Keywords:	Drop tower, Microgravity, Deceleration unit, Deceleration spike

Anotace:

Cílem této práce bylo navrhnout vhodný zádržný systém pro pádovou věž, která se bude nacházet v areálu ČVUT. Práce zahrnuje základní rešerši pádových věží a jejich zádržných systémů, základní konstrukční návrh zádržného systému a základní pevnostní analýzu. Na základě provedené rešerše a pevnostní analýzy bylo zjištěno, že nejvhodnějším řešením zádržného systému je volba zapichovacího hrotu.

Abstract:

The aim of this work was to design a suitable deceleration unit for the drop tower, which will be located in the area of CTU. The thesis includes basic research on drop towers and their deceleration units, basic design of the deceleration unit and basic strength analysis. Based on the research and carried out strength analysis, it was found out, that the most suitable solution of the deceleration unit was the choice of a deceleration spike.

OBSAH

1. Úvod.....	1
2. Teorie gravitace.....	2
2.1. Newtonův gravitační zákon	2
2.2. Obecná teorie relativity	3
2.3. Teorie mikrogravitace	3
2.3.1. Vesmírná stanice.....	4
2.3.2. Sondážní raketa	5
2.3.3. Atmosférický balon	6
2.3.4. Parabolické lety	7
3. Pádové věže	8
3.1. Pádová věž v Brémách – ZARM.....	9
3.1.1. Pádová kapsle	9
3.1.2. Zádržný systém	10
3.2. NASA Glenn Research Centre – 2,2 Second Drop Tower	11
3.3. NASA Glenn Research Centre – Zero G Research Facility.....	12
3.4. Queensland University of Technology (QUT).....	15
3.4.1. Pádová kapsle	16
3.4.2. Zádržný systém	17
3.5. National Centre for Combustion Research and Development (NCCRD), Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras):	18
3.5.1. Pádová šachta a výtah	19
3.5.2. Pádová kapsle	19
3.5.3. Zádržný systém	19
3.5.4. Konstrukce airbagu	22
3.6. National Microgravity Laboratory - China (NMLC):	23
3.6.1. Pádová kapsle	24
3.6.2. Zádržný systém:	25
3.7. IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid	28
3.7.1. Pádová kapsle	29
3.7.2. Zádržný systém	30
4. Porovnání zádržných systémů	31
4.1. Polystyrenové kuličky:	31
4.2. Airbag.....	32
4.3. Síť s lanovým systémem	33
4.4. Zapichovací hrot	34
4.5. Deformační prvek	34
4.6. Raketový motor	34
4.7. Výběr vhodného systému pro použití na ČVUT.....	35
4.7.1. Hmotnost pádové kapsle	35
4.7.2. Maximální brzdné zrychlení	36
4.7.3. Jednoduchost (složitost) konstrukce zádržného systému	37
4.7.4. Jednoduchost obsluhy zádržného systému	38

4.7.5.	Spolehlivost zádržného systému	38
4.7.6.	Souhrn všech kritérií.....	39
5.	Současný stav pádové věže na ČVUT	40
6.	Teoretický návrh konstrukce zádržného systému.....	41
6.1.	Experimentální platforma	41
6.2.	Aerodynamický štít	43
6.3.	Zapichovací hrot	45
6.4.	Pevnostní analýza spoje	47
6.4.1.	Výsledky analýzy	49
6.4.2.	Úprava modelu	50
6.5.	Nádoba se suchým pískem	54
7.	Závěr.....	55
	Reference	56
	Přílohy.....	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.: Fotografie zádržného systému z pádové věže v Brémách [1].....	1
Obr. 2.: Newtonův gravitační zákon graficky.....	2
Obr. 3.: Mezinárodní vesmírná stanice ISS [4].....	4
Obr. 4.: Start sondážní rakety [7].....	5
Obr. 5.: Příprava atmosférického balonu ke startu – NASA [10]	6
Obr. 6.: Fotografie z paluby letadla během parabolického letu [13].....	7
Obr. 7.: Vzhled pádové věže v Brémách [22].....	9
Obr. 8.: Schéma pádové věže v Brémách [15]	10
Obr. 9.: Schéma 2,2 s pádové věže [16].....	12
Obr. 10.: Kapsle uložená v uvolňovacím mechanismu na vrchu tlakové komory [25]	13
Obr. 11.: Zpomalovací nádoba ve spodní části věže [26]	14
Obr. 12.: Schématické znázornění pádové věže QUT [14].....	15
Obr. 13.: Náčrt pádové kapsle před pádem, během pádu, a na konci pádu [14]	16
Obr. 14.: Hodnoty brzdného zrychlení u typického experimentu – na ose X je čas (s) a na ose Y je úroveň gravitace (g) [14]	17
Obr. 15.: Pádová věž nacházející se na IIT Madras [2].....	18
Obr. 16.: Brzdný systém pádové věže [2]	21
Obr. 17.: Vrstvy brzdného systému: vrstva křemičitého písku (vlevo), sestava pěnových desek (uprostřed), airbag (vpravo) [2]	21
Obr. 18.: Pádová věž NMLC [19].....	23
Obr. 19.: Schéma pádové kapsle [19]	24
Obr. 20.: Schéma brzdného systému – 1. STS, 2. ocelový kabel, 3. vodící kolo, 4. ocelový kroužek, 5. vyztužená sestava elastických gumových strun, 6. vyztužená síťová sestava [19]	26
Obr. 21.: Měřená křivka zpomalení – na ose X je čas (s) a na ose Y je zrychlení pádové kapsle (g_0) [19]	27
Obr. 22.: Schéma pádové věže v IDR/UPM - 1. komín, 2. nádoba s pískem, 3. kapsle, 4. výtahový systém, 5. uvolňovací mechanismus, 6. lanové vedení [20].....	28
Obr. 23.: Schéma experimentální platformy (1) a aerodynamického štítu (2) v okamžiku uvolnění ($t=0$) a během pádu ($t>0$), (3) představuje pěnu [20]	29
Obr. 24.: Fotografie konstrukce kapsle - 1. CCD kamera, 2. osvětlení, 3. experimentální náklad, 4. zrcadlo [20]	30
Obr. 25.: Schéma spodní části pádové věže v Brémách [15]	31
Obr. 26.: Schéma airbagu [28].....	32
Obr. 27.: Fotografie lanového systému s kapslí v pádové věži NMLC [31]	33
Obr. 28.: Fotografie komína v areálu ČVUT na Karlově náměstí	40
Obr. 29.: 3D model experimentální platformy	41
Obr. 30.: Rozměry experimentální platformy s popisem jednotlivých částí - 1. hliníkový profil, 2. police, 3. deska s výztuží, 4. vypouštěcí mechanismus	42
Obr. 31.: Náčrt pozice experimentální platformy vůči aerodynamickému štítu v pozici $t=0$ a $t>0$ – 1. experimentální platforma, 2. aerodynamický štít, 3. pěna pro zastavení experimentální plošiny – převzato z [20]	43
Obr. 32.: Rozměry aerodynamického štítu.....	44
Obr. 33.: Řez 3D modelem pádové kapsle.....	44
Obr. 34.: Schéma zapichovacího hrotu s rozměry - 1. vnější část hrotu, 2. vnitřní část hrotu	45
Obr. 35.: 3D model výztuhy	46
Obr. 36.: Zobrazení spojení hrotu a aerodynamického štítu s výztuhami na 3D modelu	46
Obr. 37.: 3D model pádové kapsle se zapichovacím hrotem	47
Obr. 38.: Model sestavy, na které bude provedena pevnostní analýza	48
Obr. 39.: Zobrazení sítě modelu, včetně pevné vazby (1), osové síly (2) a kolmé síly (3)	49
Obr. 40.: Výsledky analýzy – napětí Von Mises	49
Obr. 41.: Detailní pohled na analýzu spoje.....	50
Obr. 42.: Model svařence	50

Obr. 43.: Model zapichovacího hrotu se svařencem	51
Obr. 44.: Průřez spojení aerodynamického štítu a zapichovacího hrotu.....	51
Obr. 45.: Pevnostní analýza upraveného modelu.....	52
Obr. 46.: Detailní pohled na analýzu spoje.....	52
Obr. 47.: Finální 3D model pádové kapsle se zapichovacím hrotem	53
Obr. 48.: Náčrt zapichovacího hrotu s rozměry a sváry.....	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.: Porovnání kvality, doby trvání a ceny jednotlivých typů mikrogravitačních zařízení [2]	4
Tabulka 2.: Porovnání základních parametrů pádových věží.....	8
Tabulka 3.: Parametry pádové věže v Brémách – ZARM [22].....	11
Tabulka 4.: Parametry pádové věže - 2,2 second drop tower [23].....	12
Tabulka 5.: Parametry pádové věže – Zero G research facility [24]	14
Tabulka 6.: Parametry pádové věže QUT [14]	15
Tabulka 7.: Parametry pádové věže na IIT Madras [2]	18
Tabulka 8.: Parametry pádové věže NMLC [19].....	23
Tabulka 9.: Parametry pádové věže v IRD/UPM [20]	30
Tabulka 10.: Porovnání hmotností kapslí a zádržných systémů v pádových věžích	36
Tabulka 11.: Porovnání maximálního brzdného zrychlení jednotlivých pádových věží.....	36
Tabulka 12.: Bodová tabulka pro výběr vhodného zádržného systému.....	39

1. Úvod

Pádová věž je zařízení, které slouží k simulaci stavu mikrogravitace za pomoci volného pádu. Při provedení experimentu ve věži se nejprve vynese pádová kapsle, ve které je uložen zkoumaný objekt, do horní části věže, odkud je následně kapsle vypuštěna a padá volným pádem. Na konci pádu se ve spodní části věže kapsle zpomalí a zastaví díky zádržnému systému (Obr. 1). Porozumění, jak se některé objekty či tekutiny chovají v mikrogravitačních podmínkách je důležité především pro vesmírný výzkum. Mezi další oblasti výzkumu v pádových věžích patří např. věda o materiálech, dynamika tekutin a spalování.

Cílem této práce je navrhnout vhodný zádržný systém k pádové věži, která v budoucnu bude na území ČVUT. Na Karlově náměstí v areálu ČVUT se nachází nepožívaný komín, který by šel předělat na pádovou věž.

Požadavkem je vybrat zádržný systém, který bude vhodný pro pádovou kapsli o hmotnosti 5 až 20 kg, jejíž rychlost na konci pádu bude 10 až 25 m/s. Maximální brzdné zrychlení působící na kapsli na konci pádu by nemělo překročit 50 g. Dále bude nutné klást důraz na jednoduchost konstrukce a obsluhy, a také na spolehlivost celého systému.

V práci bude nejprve provedena rešerše aktivních pádových věží a jejich zádržných systémů, na jejímž základě bude vybrán ten nejvhodnější pro použití na ČVUT. Následně je proveden základní návrh zádržného systému ve formě 3D CAD modelu.



Obr. 1.: Fotografie zádržného systému z pádové věže v Brémách [1]

2. Teorie gravitace

Gravitace je definována jako vzájemné působení mezi všemi objekty o nenulové hmotnosti, resp. jí odpovídající energii. Mezi hmotnými objekty gravitace působí přitažlivě. Pojem gravitační pole je silové pole v určitém prostoru kolem objektu, ve kterém působí gravitace daného objektu. Vzhledem k tomu, že je dosah gravitace teoreticky nekonečný, považuje se za hranici gravitačního pole místo, kde je již gravitace neměřitelná.

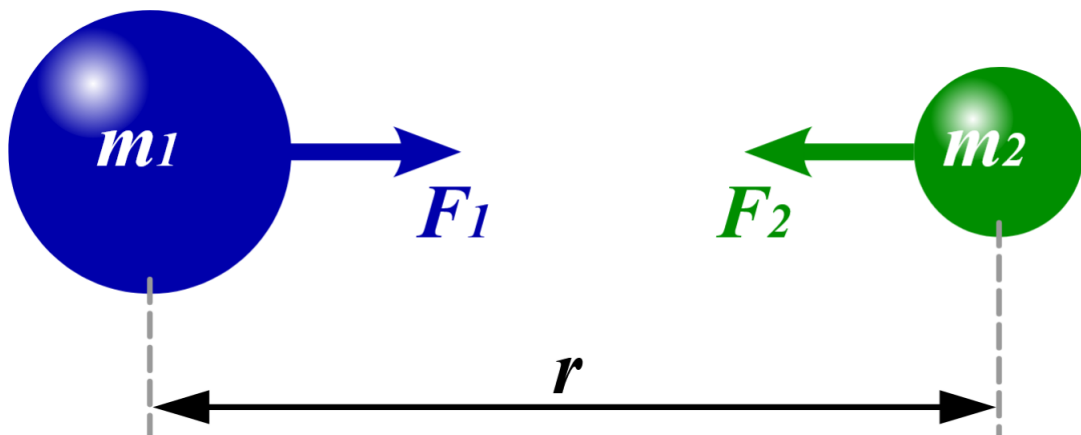
2.1. Newtonův gravitační zákon

Ve fyzice je gravitace popsána Newtonovým gravitačním zákonem, který popisuje gravitaci jako přitažlivou sílu (gravitační sílu), kterou na sebe vzájemně působí tělesa. Velikost gravitační síly je závislá na vzájemné vzdálenosti těchto těles a jejich hmotnostech. Zákon popisuje gravitaci pouze přibližně, ale pro velmi vysoké hmotnosti a pro malé rychlosti (v porovnání s rychlostí světla) je nepřesnost zanedbatelná, tudíž je stále široce využíván především díky jeho jednoduchosti.

Gravitační síla lze tedy vyjádřit Newtonovým gravitačním zákonem podle rovnice (1). Na Obr. 2 je graficky znázorněno vzájemné působení dvou těles.

$$F_g = F_1 = F_2 = G \frac{m_1 * m_2}{r^2} \quad (1)$$

Kde F_g je síla působící mezi dvěma hmotnými tělesy, m_1 je hmotnost prvního tělesa, m_2 je hmotnost druhého tělesa, r je vzdálenost mezi tělesy a G je gravitační konstanta



Obr. 2.: Newtonův gravitační zákon graficky

2.2. Obecná teorie relativity

Přesněji lze gravitaci popsat obecnou teorií relativity, kterou publikoval Albert Einstein v roce 1915. Teorie již nepopisuje gravitaci jako sílu (jako tomu je v Newtonovým gravitačním zákoně), ale jako důsledek zakřivení časoprostoru. Obecná relativita je geometrická teorie, která předpokládá, že zakřivení časoprostoru je způsobené přítomností hmoty či energie a že toto zakřivení ovlivňuje dráhu těles, a dokonce i dráhu světla. Závislost mezi zakřivením časoprostoru a přítomností hmoty či energie je vyjádřena Einsteinovými rovnicemi gravitačního pole.

2.3. Teorie mikrogravitace

Termín mikrogravitace je často považován za synonymum termínu stav beztíže, což vyjadřuje stav, během kterého na objekt nepůsobí žádná tíha. Dle Newtonova gravitačního zákona však není možné dosáhnout dokonalého stavu beztíže, vzhledem k tomu, že objekty na sebe působí i při obrovských vzdálenostech. Gravitační síly zde jsou velmi malé, ale nikdy nejsou nulové, proto je přesnější použití termínu mikrogravitace. Mikrogravitace je tedy stav, kdy na těleso působí velmi malé gravitační síly ($g < 10^{-6}$).

Výzkum za podmínek snížené gravitace umožňuje zkoumat fyzikální jevy, které jsou obvykle maskovány gravitačními silami. Aplikace výzkumu mikrogravitačních podmínek vedly ke vzniku mnoha nových produktů s bližšími aplikacemi. Většina výzkumů v oblasti mikrogravitace jsou typicky komerčně motivována ve snaze optimalizovat a porozumět různým procesům. Mezi hlavní oblasti výzkumu patří věda o materiálech, dynamika tekutin a spalování. Výzkum tekutin přinesl větší pochopení kavitace a kapilárního toku důležitého při navrhování fluidních systémů (palivové nádrže, chladicí smyčky atd.) jak ve vesmíru, tak i na zemi. Výzkum spalování se zabývá především fundamentálním výzkumem, požární bezpečnosti a studii pohonu. Požární bezpečnost je trvalý problém, protože ničivé účinky nekontrolovaného hoření ve vesmíru jsou potenciálně život ohrožující, jako tomu bylo při požáru na palubě vesmírné stanice MIR.

Schopnost provádět testy v prostředí mikrogravitace je možné díky řadě testovacích zařízení, které jsou pozemní, letové, nebo kosmické.

Mezi pozemní zařízení patří především pádové věže; letová zařízení používají letadla, sondážní rakety nebo balony; kosmické zařízení jsou v současné době omezená na raketoplán, ISS nebo vzdálené platformy. Provozní vlastnosti každého z těchto testovacích zařízení jsou definovány ve vztahu ke kvalitě mikrogravitace, době trvání testu a nákladům na test. Tabulka 1 uvádí relativní odhad kvality mikrogravitace (neboli velikosti g), doby trvání testů a náklady na testy mezi různými testovacími zařízeními.

Tabulka 1.: Porovnání kvality, doby trvání a ceny jednotlivých typů mikrogravitačních zařízení [2]

Zařízení	Trvání mikrogravitace [s]	Kvalita mikrogravitace [g]	Cena za test [EUR]
Vesmírná stanice	10^5 až 10^7	10^{-5} až 10^{-6}	10^6
Vesmírná loď	10^3 až 10^6	10^{-2} až 10^{-6}	10^6
Sondážní raketa	$\sim 10^2$	10^{-2} až 10^{-4}	10^5
Balon	$\sim 10^1$	10^{-2} až 10^{-3}	10^3 až 10^5
Parabolický let	$\sim 10^1$	10^{-2} až 10^{-3}	10^5
Pádová věž	10^0 až 10^1	10^{-2} až 10^{-6}	10^1 až 10^5

Volba vhodného zařízení k provedení konkrétního experimentu v mikrogravitačních podmínkách závisí především na takových faktorech, jako kvalita mikrogravitace, doba trvání mikrogravitace, hmotnost nákladu, cena za test a náročnost obsluhy.

2.3.1. Vesmírná stanice

Hlavní výhodou vesmírné stanice je doba trvání mikrogravitace a její kvalita mikrogravitace. V porovnání s dalšími zařízeními pro testování mikrogravitace má velmi vysokou kvalitu mikrogravitace (až 10^{-6} g) a jednoznačně nejdelší dobu trvání mikrogravitace (řádově se jedná o dny až měsíce). Hlavní nevýhodou však je cena za provedení jednoho experimentu (řádově 10^5 až 10^6 EUR). V současnosti lze tyto experimenty provádět na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS).

Většina experimentů prováděných na stanici ISS (Obr. 3) především využívá velmi kvalitní a dlouho trvající podmínky mikrogravitace. Mezi hlavní oblasti výzkumu se řadí experimenty v oblasti fyziky (dynamika kapalin, materiálové vědy, kvantová fyzika), biologie, astronomie a meteorologie. V oblasti biologie je výzkum věnován především studiu dlouhodobého pobytu člověka v mikrogravitačních podmínkách. Dále jsou zde zkoumány vlivy kosmického záření a radiace na člověka [3].


Obr. 3.: Mezinárodní vesmírná stanice ISS [4]

2.3.2. Sondážní raketa

Sondážní raketa je zařízení, které slouží k provádění experimentů ve výšce 50 km až 1500 km nad povrchem Země, což je oblast kam se již nedostane atmosférický balon (maximálně 40 km). Často se u sondážních raket používají nadbytečné vojenské raketové motory.

Sondážní rakety jsou ve většině případů poháněné raketovými motory na tuhé palivo. Raketa se většinou skládá z pohonného systému a vědeckého nákladu. Po dosažení požadované výšky či spotřebování paliva se od rakety oddělí první stupeň, zatímco náklad pokračuje v letu. U vícestupňové rakety se po oddělení prvního stupně zažehne druhý stupeň, případně třetí a po dosažení požadované výšky nebo spotřebování paliva pokračuje samotný náklad v letu [5].

Výzkum v mikrogravitačních podmínkách lze u sondážních raket provádět po vypnutí a oddělení pohonného systému až do doby, kdy se náklad vrátí do stratosféry. Doba trvání mikrogravitace je zde řádově několik minut a kvalita mikrogravitace dosahuje hodnot až 10^{-4} g.

Hlavní výhodou sondážní rakety je nízká cena v porovnání s vesmírnou stanicí, poměrně krátká doba potřebná pro přípravu startu (okolo 6 měsíců) a možnost provádět experimenty ve výškách, kde to již není možné s atmosférickými balony [6].



Obr. 4.: Start sondážní rakety [7]

2.3.3. Atmosférický balon

Atmosférické balony se používají již několik desetiletí k provádění vědeckých studií. Balon lze vypustit téměř z jakéhokoliv místa na světě a jelikož nevyžaduje žádné speciální výzkumné zařízení, jedná se tedy o levnou metodu ke zkoumání mikrogravitace. U dnešních balonů dosahuje kvalita mikrogravitace hodnot až 10^{-3} g a doba trvání mikrogravitace je několik sekund, což je nevýhodou ve srovnání s předchozími zařízeními. Moderní balony jsou schopné dosahovat výšek až 50 km a délka trvání jejich mise může být řádově několik hodin až několik dnů/měsíců [8]. Nejčastěji se využívají ke zkoumání atmosféry (teploty, proudění vzduchu, tlaku, vlhkosti), magnetického pole, složení vzduchu, ozonové vrstvy a radiace z vesmíru [9].

Hlavní výhodou při použití atmosférického balonu pro experiment v mikrogravitačních podmínkách je jeho cena v porovnání s předchozími zařízeními a také možnost provést experiment téměř kdekoli na světě bez nutnosti použití speciálního výzkumného zařízení (budovy). Nevýhodou však je doba trvání mikrogravitace (několik sekund) v porovnání s předchozími zařízeními.



Obr. 5.: Příprava atmosférického balonu ke startu – NASA [10]

2.3.4. Parabolické lety

Parabolické lety se využívají ke tréninku astronautů nebo k vědeckým výzkumům za použití speciálně upraveného dopravního letadla.

Princip parabolických letů spočívá v tom, že objekty či účastníci nacházející se na palubě letadla se pohybují setrvačností po stejné dráze jako samotné letadlo. Průběh parabolického letu je takový, že nejprve letadlo stoupá z určité výšky pod úhlem 47°. Během tohoto stoupaní působí na letadlo včetně posádky přetížení 1,8g. Po dosažení určité výšky se začne letadlo pohybovat po trajektorii odpovídající šikmému vrhu, díky čemuž je dosažen stav mikrogravitace. Po této trajektorii letoun letí po dobu 20 až 30 sekund, což znamená, že doba trvání mikrogravitace je stejně dlouhá. Následně je zahájeno klesání, které trvá okolo 20 sekund a probíhá pod úhlem 45°. Během klesání opět působí na posádku přetížení o velikosti 1,8g. Po provedení jednoho vzestupu a sestupu se většinou celý proces několikrát opakuje. Takže celková doba trvání mikrogravitace během jednoho letu může dosáhnout až deseti minut [11].

Hlavní výhodou parabolických letů je to, že se jedná o jedinou možnost, jak lze otestovat působení mikrogravitace na člověka, aniž by se musel podniknout let do vesmíru. Díky tomu lze provádět v mikrogravitačních podmínkách experimenty ke kterým je potřeba i obsluha. Kvalita mikrogravitace dosahuje hodnot až 10^{-3} g [12].



Obr. 6.: Fotografie z paluby letadla během parabolického letu [13]

3. Pádové věže

Pádová věž je zařízení, které se používá k simulaci stavu beztlíže na zkoumaném tělese, čímž je umožněno zkoumání účinků mikrogravitace na experimentálním tělese. Jedná se o jeden z nejjednodušších a nejlevnějších způsobů, kterým lze na zemi zkoumat účinky mikrogravitace.

Pádová věž typicky produkuje velmi kvalitní mikrogravitační podmínky, ale doba trvání testu je obvykle krátká. Testování v pádové věži je méně nákladné a snadno přístupné výzkumným pracovníkům, což umožňuje provádět více testů za nižší náklady. Doba trvání testu se u pádových věží pohybuje v rozmezí od 1 do 10 sekund s gravitací mezi 10^{-4} g až 10^{-6} g. Výzkumy se často provádí v pádové věži za nízké náklady, aby se zjistilo, zda se vyplatí provádět testy v dražších zařízeních s déle trvajícím testy [10] [14].

Princip fungování pádové věže spočívá v tom, že se zkoumané těleso uloží do horní části věže do tzv. kapsle, která se následně vypustí a padá kontrolovaným volným pádem do spodní části, kde padající těleso zpomalí a kompletně zastaví brzdný systém. Pro zlepšení podmínek experimentu se používají aerodynamické štíty nebo vakuová komora (či komora naplněna inertním plynem), aby se dosáhlo co nejmenšího odporu při pádu.

Doba trvání volného pádu v pádové věži závisí převážně na dvou faktorech – na výšce pádové věže a na prostředí ve kterém probíhá experiment. Například v Marshall Space Flight Center je možné u 105 metrů vysoké věže dosáhnout stavu beztlíže po dobu 4,6 sekund. Ve věži na Univerzitě v Brémách (ZARM) lze prodloužit stav beztlíže ze 4,74 vteřin na téměř 9,3 vteřin za použití katapultu, který zkoumané těleso nejprve vyhodí nahoru, čímž se prodlouží stav beztlíže téměř na dvounásobnou dobu. Americká NASA má v Glennově výzkumném středisku (Glenn Research Center) k dispozici dvě pádové věže – první 140 metrů vysokou s dobou trvání volného pádu 5 vteřin (The Zero Gravity Facility) a druhou 24 metrů vysokou s dobou trvání volného pádu 2,2 vteřiny (The 2,2 Second Drop Tower). Porovnání dalších pádových věží je možné vidět v tabulce (Tabulka 2).

Tabulka 2.: Porovnání základních parametrů pádových věží

Název zařízení	Provedení	Zádržný systém	g/g ₀	h [m]	t [s]
ZARM, Brémy [15]	Vakuová komora	Polystyrénové kuličky	10^{-6}	110	4,74 (9,3)
NASA Glenn Research Center, 2,2 Second Drop Tower [16], [17]	Aerodynamický štít	Airbag	10^{-3}	24	2,2
NASA Glenn Research Center, Zero G Research Facility [16]	Vakuová komora	Polystyrénové kuličky	10^{-5}	132	5,18
Queensland University of Technology [14], [18]	Aerodynamický štít	Airbag	10^{-4}	23,5	2,0
Indian Institute of Technology Madras [2]	Vakuová kapsle s aerodynamickým štítem	Airbag	10^{-4}	30,5	2,5
National Microgravity Laboratory – China [19]	Vakuová kapsle s aerodynamickým štítem	Sít s lanovým systémem	10^{-5}	83	3,5
IDR/UPM, Universidad Politécnic de Madrid [20]	Aerodynamický štít	Zapichovací hrot	10^{-3}	13,15	1,6

3.1. Pádová věž v Brémách – ZARM

V roce 1985 bylo založeno centrum aplikované vesmírné technologie a mikrogravitace (ZARM) jako ústav Univerzity Brémy (University Bremen), který se zaměřuje na výzkum gravitačních a kosmických jevů. Další vědecké obory zkoumané na ústavu jsou: základní fyzika, spalování, vícefázový tok, metrologie kapalin, kosmická technologie, aerodynamika, komplexní kapaliny a materiály.

Hlavním zařízením ZARM je pádová věž (Drop Tower Bremen) na Obr. 7, jejíž výstavba byla zahájena v roce 1988. Od té doby upoutává pozornost věž s výškou 146 metrů a charakteristickou skleněnou střechou, která se stala znakem technologického centra v Brémách. Zařízení nabízí až 3x denně možnost provedení experimentu ve velmi kvalitních mikrogravitačních podmínkách [21].

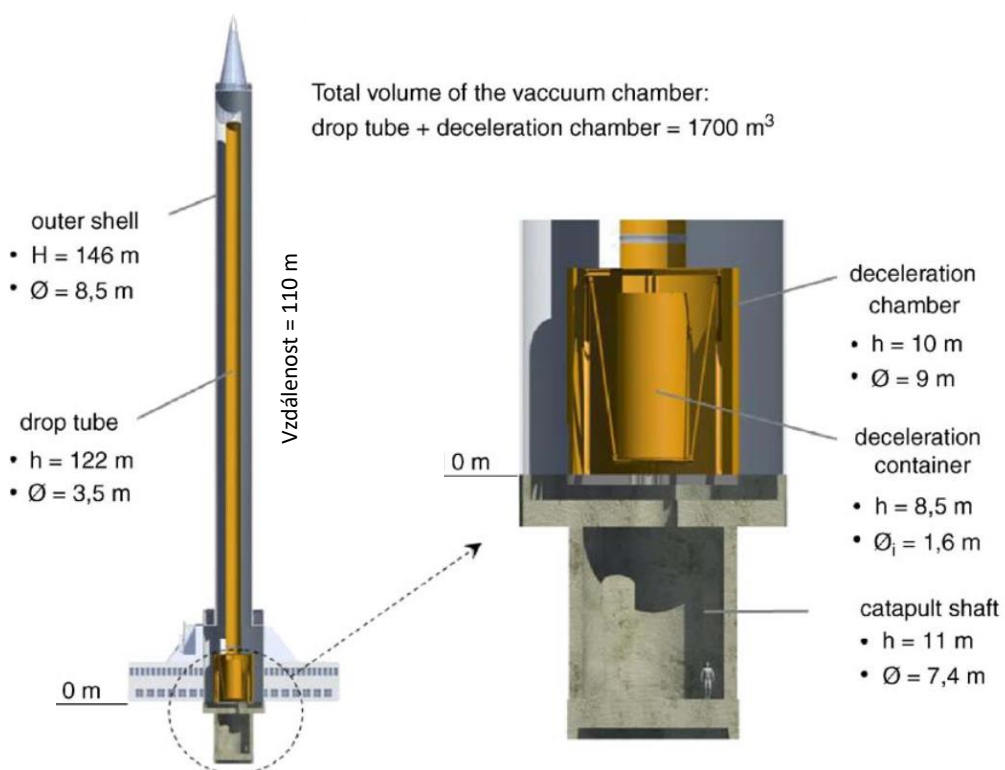


Obr. 7.: Vzhled pádové věže v Brémách [22]

3.1.1. Pádová kapsle

V pádové věži lze k experimentu použít jeden ze dvou typů kapslí (standartní kapsle či kapsle s katapultem), ve které bude uložený zkoumaný objekt. Oba typy kapslí mají válcový tvar o průměru 814 mm, avšak katapultová kapsle je dlouhá 2094 mm a standartní kapsle má délku 2860 mm. Hlavní rozdíl mezi těmito typy je délka trvání experimentu. Při použití standartní kapsle trvá experiment 4,74 s, přičemž kapsle se vypouští z výšky 110 metrů. U katapultové kapsle je délka trvání experimentu téměř dvojnásobná, tedy 9,3 s. Zde je kapsle uložena v katapultovém pístu v hloubce 11 metrů pod základnou věže. Pro minimalizaci odporu působícího na padající kapsli se musí vyprázdnit tlaková komora, ve

které probíhá experiment. Vypouštění vzduchu z komory trvá okolo 1,5 hodin. Po dokončení vyprazdňování komory se vystřelí kapsle do prostoru věže se zbytkovým tlakem 10 Pa. Na začátku experimentu dochází ke vzniku tzv. počátečního rušení způsobeném uvolněním nebo vystřelením kapsle. Po utlumení tohoto rušení lze u standardního experimentu (volný pád přibližně 110 m) či u katapultového experimentu (vertikální parabolický let) detekovat zrychlení o velikosti pouhých 10^{-6} g. Tudíž mikrogravitace dosažená v pádové věži je o několik řádů kvalitnější než mikrogravitace, které lze dosáhnout v ostatních zařízeních [15].



Obr. 8.: Schéma pádové věže v Brémách [15]

3.1.2. Zadržný systém

Na konci experimentu kapsle dopadá do brzděné nádoby, ve které se jemně zastaví. Standardní kapsle dopadá konečnou rychlostí 167 km/h a katapultová kapsle dopadá konečnou rychlostí 175 km/h. Brzděná nádoba je naplněna jemnými polystyrénovými kuličkami. Zde působí na padající kapsli maximální brzděné zrychlení o velikosti 50 g a náraz kapsle trvá okolo 200 ms. U experimentu s katapultem trvá start okolo 300 ms a katapultová kapsle je zde urychlena až na 30 g [21].

Pro získání kapsle z brzděné nádoby je potřeba nejprve napustit vakuovou komoru vzduchem. Tento proces trvá asi 20 minut [21].

Tabulka 3.: Parametry pádové věže v Brémách – ZARM [22]

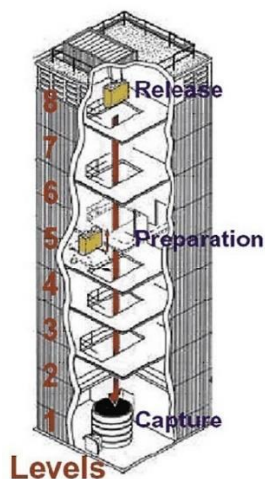
Pádová věž v Brémách – ZARM		
Typ kapsle	Standartní	Katapultová
Délka volného pádu	110 m	110 m
Doba trvání mikrogravitace	4,74 s	9,3 s
Doba nárazu (brždění)	200 ms	200 ms
Rychlost dopadu	46,4 m/s	48,6 m/s
Hodnota mikrogravitace	10^{-6} g	10^{-6} g
Parametry kapsle		
Výška kapsle	2860 mm	2094 mm
Průměr kapsle	814 mm	814 mm
Maximální hmotnost nákladu	221,2 kg	161,5 kg
Celková hmotnost kapsle	500 kg	400 kg
Parametry brzdného systému		
Typ brzdného systému	Nádoba s polystyrenovými kuličkami	
Výška nádoby	8,5 m	
Průměr nádoby (průměrný)	1,6 m	
Tvar nádoby	Komolý kužel	
Maximální brzdné zrychlení	50 g	

3.2. NASA Glenn Research Centre – 2,2 Second Drop Tower

Pádová věž *2,2 Second Drop Tower* je jedna ze dvou pádových věží nacházejících se v Glenově výzkumném středisku (NASA Glenn research centre) v Brook parku v Ohiu (Obr. 9). Na začátku se věž používala jako destilační zařízení vysoké 30 metrů, ale již přes 50 let se používá ke zkoumání účinků mikrogravitace na fyzikální jevy, jako je spalování a dynamika tekutin, a k vývoji nových technologií pro budoucí vesmírné mise.

Mnoho mikrogravitačních experimentů prováděných na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS) začínají na zemi právě průzkumnými zkouškami v pádové věži. Toto může být následováno dalšími zkouškami v pádových věžích k ověření či optimalizování konstrukce hardwaru a k nalezení nejlepších testovacích podmínek pro vesmírné experimenty [23].

Jak lze poznat již z názvu zařízení, celková doba trvání experimentu je 2,2 sekundy a kapsle padá volným pádem z výšky 24 m. K minimalizaci aerodynamického odporu při volném pádu se v pádové věži používá štítový systém. Kapsle se skládá z obdélníkového hliníkového rámu, ve kterém je poskládán zkoumaný experiment, a z aerodynamicky navrženého odporového štítu, ve kterém je hliníkový rám uzavřen. Celková hmotnost aerodynamického štítu je 330 kg. Kapsle se zvedne do vrchní části věže (8. patro), kde je připojena k monitorovacímu zařízení (např. vysokorychlostní videokamery a palubní počítače). Prostředí se sníženou gravitací vzniká volným pádem kapsle z osmého do prvního patra, což odpovídá vzdálenosti 24 m. Zkoumaný experiment není připojen ke štítu, díky čemuž je izolován od aerodynamického odporu. Během volného pádu kapsle padá i samotný experiment uvnitř aerodynamického štítu celkem o 19 cm. Pád končí, když se kapsle zastaví pádem do airbagu, který je umístěn ve spodní části věže [16].



Obr. 9.: Schéma 2,2 s pádové věže [16]

Tabulka 4.: Parametry pádové věže - 2,2 second drop tower [23]

NASA Glenn Research Centre – 2,2 Second Drop Tower	
Délka volného pádu	24 m
Doba trvání mikrogravitace	2,2 s
Hodnota mikrogravitace	10^{-3} g
Parametry kapsle	
Výška experimentální platformy	840 mm
Rozměry experimentální platformy	960 mm x 400 mm
Maximální hmotnost nákladu	159 kg
Celková hmotnost kapsle	487 kg
Parametry brzdného systému	
Typ brzdného systému	Airbag
Maximální brzdné zrychlení	30 g

3.3. NASA Glenn Research Centre – Zero G Research Facility

Výzkumné zařízení nulové gravitace *Zero Gravity Research Facility* je přední zařízení NASA pro pozemní výzkum mikrogravitace a největší zařízení svého druhu na světě. Jedná se o jedno ze dvou zařízení pro výzkum mikrogravitace nacházející se v Glennově výzkumném středisku (NASA Glenn research centre) v Brook parku v Ohio (Obr. 10). Zařízení je v provozu od roku 1966. Původně bylo zařízení navrženo a postaveno během éry vesmírných závodů v 60. letech 20. století k podpoře výzkumu a vývoje komponentů používaných u kosmických letů a ke zkoumání fyziky tekutin ve stavu beztíže/prostředí mikrogravitace. V současné době je zařízení využíváno výzkumníky z celého světa financovanými NASA ke zkoumání účinků mikrogravitace působící na fyzikální jevy, jako je spalování a fyzika tekutin, k vývoji a demonstraci nových technologií pro budoucí vesmírné mise a k vývoji a testování experimentálního hardwaru určeného pro let na palubě Mezinárodní vesmírné stanice (ISS) nebo budoucí kosmické lodi.

Zařízení poskytuje výzkumným pracovníkům mikrogravitační prostředí po dobu 5,18 sekundy. Umožněním volného pádu experimentálního objektu z výšky 132 m je vytvořeno prostředí mikrogravitace v zařízení Zero Gravity Research Facility.

Experimenty se v zařízení provádí uvnitř ocelové vakuové komory o celkové výšce 142 m. Komora o průměru 6,1 m se nachází uvnitř betonové šachty o průměru 8,7 m, která zasahuje 155 m pod úroveň terénu. Před provedením experimentu je ještě nutné snížit tlak v komoře na 0,05 torr (standartní atmosférický tlak = 760 torr) pomocí pětistupňové vakuové pumpy, aby se snížil aerodynamický odpor volně padající kapsle se zkoumaným experimentem na méně než 0,00001 g. Dále je ještě nutné umístit kapsli a uvolňovací mechanismus do horní části vakuové komory, což se provede použitím mostového jeřábu. Jakmile je kapsle na místě, je připojena k řídicí místnosti zařízení pomocí umbilikálního kabelu. Tento kabel umožňuje sledování a řízení experimentu z řídicí místnosti až do inicializace uvolňovací sekvence. Snížení tlaku v komoře trvá přibližně hodinu. Jakmile je v komoře dosaženo požadovaného tlaku, je zahájena uvolňovací sekvence. Zahájení volného pádu z výšky 132 m umožňuje experimentu dálkové uvolnění speciálně navrženého šroubu. Během pádu experiment funguje autonomně díky umístění zdroje napětí, sběru dat a řízení společně s experimentem uvnitř volně padající kapsle [24].

Po volném pádu trvajícím 5,18 s se kapsle zastaví v brzdě nádoby, která je umístěna ve spodní části komory (Obr. 11). Nádobka o výšce téměř 6,1 m a průměru 3,3 m je naplněna expandovanými polystyrenovými kuličkami o průměru 3 mm, které rozptylují kinetickou energii kapsle padající do brzdě nádoby rychlostí okolo 50,5 m/s. Kapsle je zastavena ve hloubce přibližně 4,6 m expandovaného polystyrenu s maximálním působícím zpomalením blízkým se 65 g [24].

Samotná kapsle slouží jako nosná konstrukce a chrání experimentální náklad před nárazovým zatížením ke kterým dochází během zpomalování a zastavení. Typická kapsle má válcový tvar o průměru 1 m a celkové délce 4 m. Maximální hmotnost kapsle včetně nákladu je 1130 kg. Maximální hmotnost nákladu uvnitř kapsle je 455 kg.

V tabulce 5 jsou uvedeny parametry pádové věže Zero G Research Facility.



Obr. 10: Kapsle uložená v uvolňovacím mechanismu na vrchu tlakové komory [25]



Obr. 11.: Zpomalovací nádoba ve spodní části věže [26]

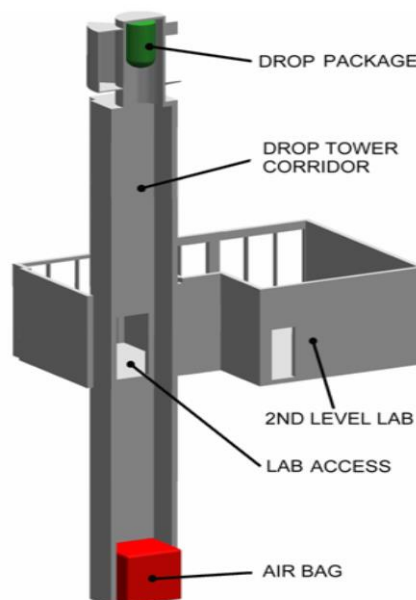
Tabulka 5.: Parametry pádové věže – Zero G research facility [24]

NASA Glenn Research Centre – Zero G research facility	
Délka volného pádu	132 m
Doba trvání mikrogravitace	5,18 s
Rychlost dopadu	50,5 m/s
Hodnota mikrogravitace	10^{-5} g
Parametry kapsle	
Výška kapsle	4000 mm
Průměr kapsle	1000 mm
Maximální hmotnost nákladu	455 kg
Celková hmotnost kapsle	1130 kg
Parametry brzdného systému	
Typ brzdného systému	Nádoba s polystyrenovými kuličkami
Výška nádoby	6,1 m
Průměr nádoby	3,3 m
Maximální brzdné zrychlení	65 g

3.4. Queensland University of Technology (QUT)

Pádová věž nacházející se na Queensland University of Technology (QUT) v Austrálii se používá k vytvoření vysoce kvalitního prostředí mikrogravitace po dobu 2,0 sekund. Věž je obsluhována laboratoří Phenomena in Microgravity Laboratory (PML) a provozuje několik výzkumných programů (např. v oblastech spalování, dynamiky tekutin, nanomateriálů atd.) zkoumajících jevy závislé na gravitaci.

Pádová věž QUT, schematicky znázorněná na Obr. 12, je zařízení vyvinuté pro použití vědeckou a inženýrskou komunitou. Je schopné vyvinout mikrogravitaci vysoké kvality po dobu 2,0 sekund, při relativně nízkých nákladech na testování, poskytuje vynikající testovací prostředí pro experimenty vyžadující přístup k mikrogravitačním podmínkám. Tabulka 6 obsahuje funkční parametry pádové věže. Doba trvání jednoho mikrogravitačního experimentu je 2,0 sekund a podle potřeby je možné provést 15-20 experimentů denně [14].



Obr. 12.: Schématické znázornění pádové věže QUT [14]

Tabulka 6.: Parametry pádové věže QUT [14]

Queensland University of Technology (QUT)	
Délka volného pádu	23,5 m
Doba trvání mikrogravitace	2,0 s
Doba nárazu (brždění)	0,25 s
Hodnota mikrogravitace	$> 10^{-4}$ g
Parametry kapsle	
Výška experimentální platformy	900 mm
Průměr experimentální platformy	800 mm
Maximální hmotnost nákladu	150 kg
Parametry brzdného systému	
Typ brzdného systému	Airbag
Maximální brzdné zrychlení	25 g

3.4.1. Pádová kapsle

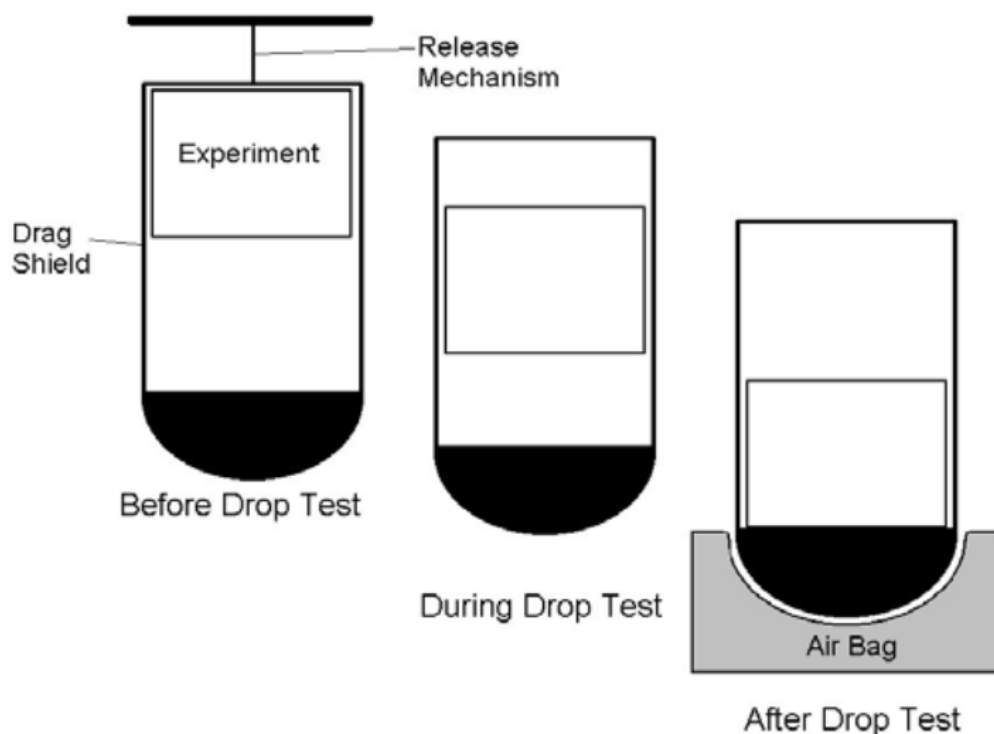
Kapsle je složená z aerodynamického štítu a z experimentální platformy. Experimentální platforma má průměr o velikosti 800 mm, je vysoká 900 mm a je schopna nést experimentální přístroje o hmotnosti maximálně 150 kg. Na všechny objekty namontované na experimentální platformě působí podmínky mikrogravitace [27].

V pádové věži je k dispozici několik podpurných zařízení:

1. Národní systém sběru dat a kontroly dat (NI DACS)
2. AC/DC napájení
3. Stlačené plyny
4. Více přístupových bodů k pádové věži
5. Technická podpora a podpora pracovníků pádové věže
6. Prostor pro návštěvníky s přístupem k počítači

Pádová věž je přístupná z více podlaží, přičemž laboratoř v druhém podlaží se obvykle používá pro většinu interakcí s experimentálním nákladem. V horní a spodní části věže je kapsle přístupná pro drobné úpravy před pádem a po pádu [14].

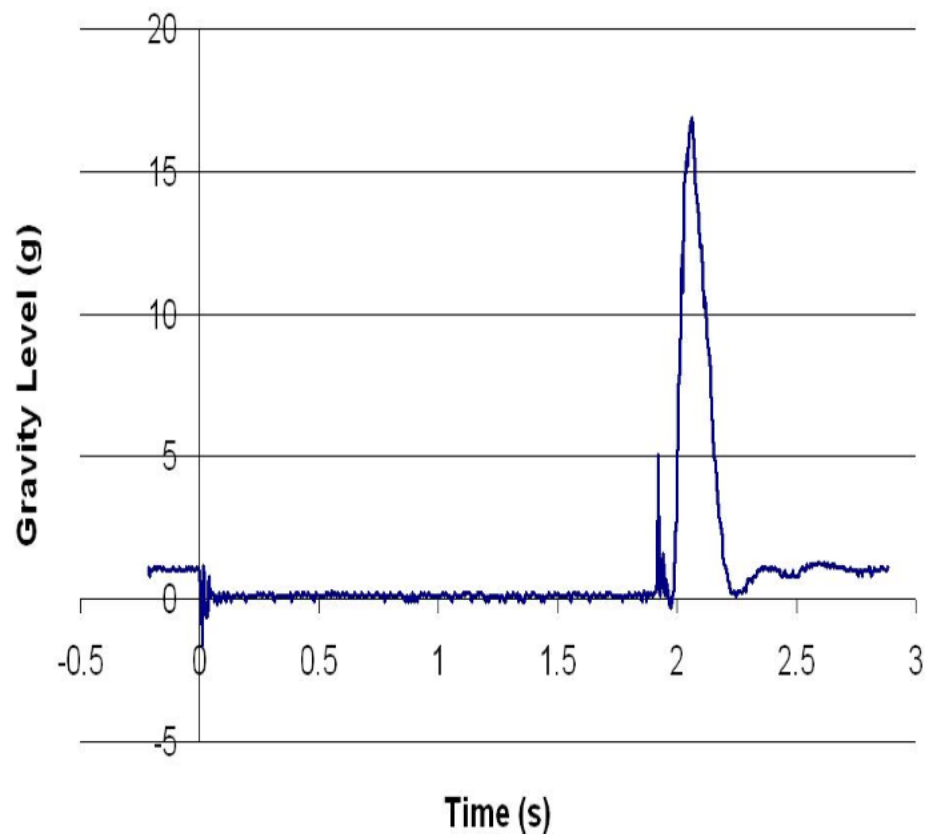
Před začátkem každého testu je kapsle vynesena na vrchol věže a zavěšena na uvolňovacím mechanismu s tenkým drátem. Drát je následně přestřižen a kapsle se uvolní, aby mohla volně spadnout do spodní části věže, kde je pak zpomalena velkým odvětrávaným airbagem. Řízené odvětrávání vzduchu zajišťuje, že se kapsle rychle a bezpečně zastaví. Během pádu je experimentální plošina uzavřena uvnitř aerodynamického štítu (Obr. 13). To chrání experimentální náklad před účinky aerodynamického odporu a vysokými zpomalovacími silami o velikosti až 25 g [18].



Obr. 13.: Náčrt pádové kapsle před pádem, během pádu, a na konci pádu [14]

3.4.2. Zadržný systém

Pádová věž obsahuje inovativní metodu zpomalení kapsle na konci testu. Toho je dosaženo odvětrávaným airbagem, který je schopný absorbovat velké množství kinetické energie. Konstrukce tohoto airbagu byla založena na práci Snydera a kol. [28]. Typická křivka zpomalení z akcelerometru nacházejícím se na experimentální plošině (Obr. 14) [14].



Obr. 14.: Hodnoty brzdného zrychlení u typického experimentu – na ose X je čas (s) a na ose Y je úroveň gravitace (g) [14]

3.5. National Centre for Combustion Research and Development (NCCRD), Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras):

Pádová věž nacházející se na Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras) (Obr. 15) je postavena jako součást Národního centra pro výzkum a vývoj spalování (National Centre for Combustion Research and Development) s primárním cílem poskytnout platformu pro výzkum mikrogravitačního spalování. Zařízení umožňuje vlastní experimenty a umožňuje studentům z jiných univerzit a výzkumným pracovníkům provádět své experimenty. Specifikace pádové věže jsou uvedeny v přiložené tabulce (Tabulka 7).



Obr. 15.: Pádová věž nacházející se na IIT Madras [2]

Tabulka 7.: Parametry pádové věže na IIT Madras [2]

Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras)	
Délka volného pádu	30,5 m
Doba trvání mikrogravitace	2,5 s
Hodnota mikrogravitace	$< 10^{-4}$ g
Parametry kapsle	
Výška experimentální platformy	670 mm
Průměr experimentální platformy	500 mm
Maximální hmotnost nákladu	300 kg
Celková hmotnost kapsle	600 kg
Parametry brzdného systému	
Typ brzdného systému	Airbag
Maximální brzdné zrychlení	< 20 g

3.5.1. Pádová šachta a výtah

Pádová šachta pádové věže IIT Madras je vyrobená z betonové trubky o rozměrech 2,4 m × 2,4 m v průřezu a výšce 39,2 m. Pádová šachta má tři hlavní části. Hlavní místnost, která je strojovnou pro výtah, střední část – oblast volného pádu a zpomalovací jednotka, která se nachází ve spodní části. Řídicí místnost a integrace experimentů v kapsli se provádí ze stanice v prvním patře. Pod stanicí je asi prostor 6 m vyhrazen pro zpomalovací jednotku pádové věže.

Před každým pádem je kapsle vynesena do nejvyšší pozice pomocí výtahu. Platforma výtahu o rozměrech 2 m × 2 m je podepřena dvěma kolejnicemi po obou stranách, takže se za žádných okolností nemůže viklat. Stoupající rychlost výtahu je udržována na 0,1 m/s [2].

3.5.2. Pádová kapsle

Pádová kapsle je válcového tvaru s aerodynamickým tvarem, která slouží jako rám pro uložení experimentálního zařízení, sofistikovaných přístrojů a systémů sběru dat. Kapsle je spuštěna z horní části věže a je bezpečně zastavena pomocí zádržného systému na konci pádu. Kvalita mikrogravitace v pádové kapsli závisí na odporu vzduchu neboli na odporové síle, která na něj působí.

Používají se různé metody, jak snížit účinek atmosférického odporu na padající kapsli:

- Vyprázdnění tlakové komory ve věži. (používá se ve věžích s dlouhou dobou trvání volného pádu, odpor je eliminován v maximální možné míře)
- Aerodynamický tvar kapsle (pro krátké věže)

Pádová kapsle používaná v IIT Madras je složena z vnější kapsle, která slouží jako aerodynamický štít a vnitřní kapsle, ve které se nachází zkoumaný náklad. Vnitřní prostor vnější kapsle může být evakuován, aby vnitřní kapsle nacházející se uvnitř vnější kapsle volně padala do vakua.

Tento systém však vyžaduje speciální elektromagnetický zadržovací mechanismus pro udržení vnitřní a vnější kapsle pohromadě na začátku pádu, aby mezi nimi nebylo žádné fyzické spojení. I když by nebyl prostor mezi vnitřní a vnější kapslí evakuován, tak odpor, který na vnitřní kapsli působí, bude ve srovnání se systémem jednotné kapsle mnohem nižší. To je díky nízké relativní rychlosti vnitřní kapsle vzhledem k vnější kapsli. Tohoto lze dosáhnout zvýšením balistického koeficientu vnější kapsle, čímž se minimalizuje odporová síla působící na vnější kapsli [2].

3.5.3. Zádržný systém

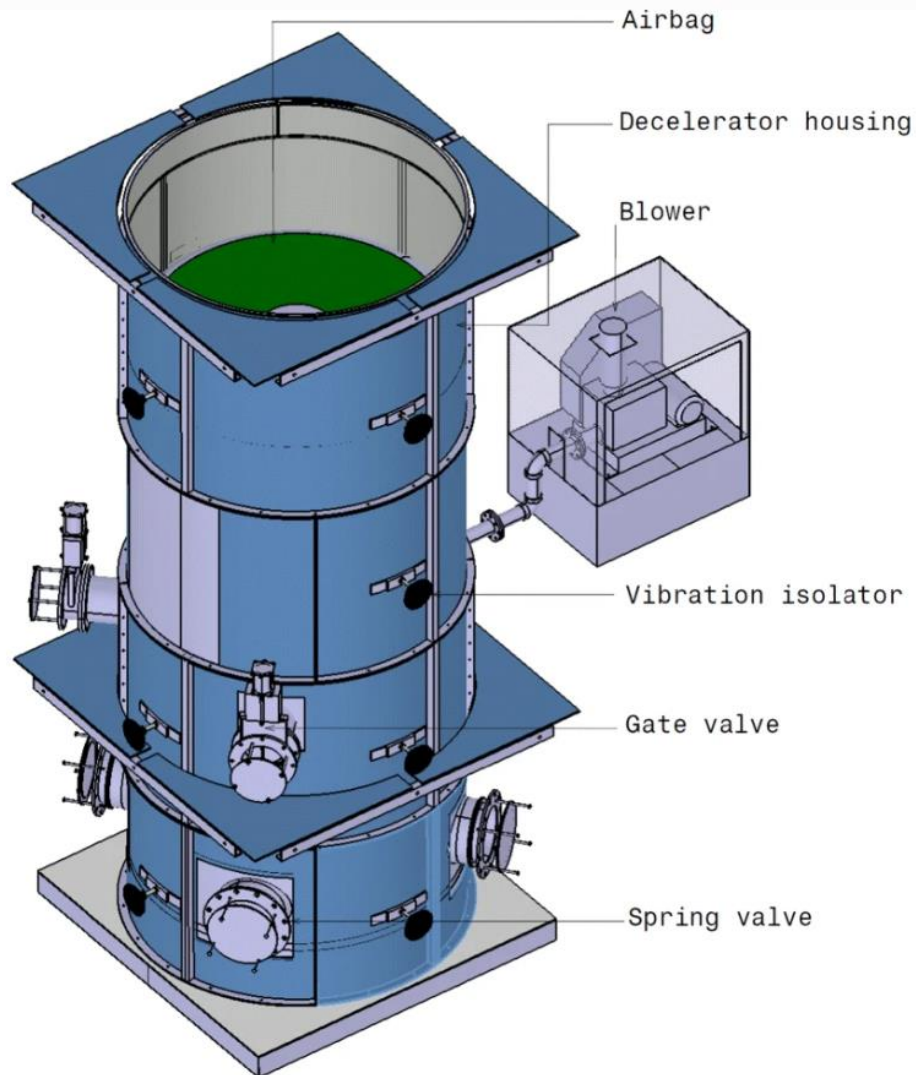
Zpomalovací jednotka slouží k "zachycení" padající kapsle tak, aby byla zachována integrita kapsle, citlivých elektronických přístrojů a experimentální sestavy. Ideální by bylo nastavit brzdný systém tak, aby bylo možné kapsli zpomalovat co nejvíce rovnoměrně a udržet rozdíl mezi hodnotou maximálního zpomalení a průměrnou hodnotou zpomalení na nejnižší úrovni. Většina aktuálně používané citlivé elektroniky má hodnotu nárazu (tzv. shock rating) menší než 30 g. Optika používaná pro experimentální pozorování má taktéž

hodnotu nárazu menší než 30 g. Z tohoto důvodu musí brzdný systém udržovat hodnotu maximálního zpomalení menší než 30 g.

V závislosti na různých parametrech, jako je výška věže, hmotnost padající kapsle, geometrické vlastnosti kapsle, dostupný prostor pro zpomalení, se po celém světě používají různé techniky zpomalení pro různá zařízení pro pádové věže.

Zpomalovací jednotka znázorněná na Obr. 16 byla speciálně navržena tak, aby poskytovala měkké přistání pro volně padající kapsli a aby měla stanici pro montáž kapsle na jednotku uchycení a uvolnění. Řízené zpomalení kapsle je dosaženo pomocí nafukovacího airbagu. Odporová tlaková síla v airbagu umožňuje konstantní zpomalování kapsle. Pro zvýšení bezpečnosti je airbagový systém umístěn na sestavě pěnových desek. Pěnové desky na bázi esterů o tloušťce 60 mm jsou uspořádány soustředně, polotuhé pěnové desky s vysokou hustotou jsou umístěny ve středu a pevné pěnové desky s nízkou hustotou jsou umístěny na okraji. Pěnové desky jsou dále umístěny na vrstvě suchého křemičitého písku. Pěnové desky slouží jako další úroveň zpomalení kapsle ke konci vyfouknutá airbagu a také slouží jako rezervní brzdný systém v případě poruchy airbagu. Uspořádání různých úrovní zpomalení je znázorněno na Obr. 17. Celá zpomalovací sestava je umístěna uvnitř válcové nádoby o průměru 2 mm o tloušťce 6 mm.

V horní části zpomalovací jednotky je sklápěcí dvoudveřová platforma, která zůstává uzavřena během montáže kapsle uvnitř pádové šachty a zůstává otevřena během experimentů. Platformy jsou k dispozici v různých výškách pro přístup k otvorům a kontrolním oknům v nádobě, ve které se brzdný systém nachází. Nádoba je navržena tak, aby udržela airbag v určité poloze a aby odolala nárazu padající kapsle a následným vibracím. Na okraji nádoby jsou k dispozici antivibrační podložky v dostatečném počtu, aby byla chráněna před nárazem [2].



Obr. 16.: Brzdňý systém pádové věže [2]



Obr. 17.: Vrstvy brzdňého systému: vrstva křemičitého písku (vlevo), sestava pěnových desek (uprostřed), airbag (vpravo) [2]

3.5.4. Konstrukce airbagu

Hlavní součástí brzdné jednotky je airbag, což je speciálně navržená nafukovací jednotka s řadou výstupních otvorů a jedním vstupním otvorem. Díky tomu je umožněno řízení uzavírací rychlost větracích otvorů tak, aby bylo dosaženo požadované míry zpomalení. Dále byla výroba válcového airbagu nejvhodnější ve srovnání s jinými tvary, což snížilo počet švů potřebných pro šití. Výška airbagu je navržena tak, aby úplně pojmula padající kapsli a nabídla dostatečnou vzdálenost pro zpomalení, čímž se prodlouží doba nárazu.

Velikost vstupního otvoru je navržena tak, aby doba nafouknutí airbagu nebyla příliš dlouhá. Výstupní otvory mají větší rozměry, aby se zajistil vysoký odtok vzduchu z airbagu během pádu kapsle. Airbag je vyroben z polyesterové tkaniny potažené PVC o tloušťce 1350 GSM (grams per square meter = gramů na metr čtvereční). Horní povrch airbagu je opatřen nárazovým polstrováním a spodní část je opatřena další vrstvou tkaniny pro větší pevnost. Vstupní a výstupní otvory jsou opatřeny pouzdry, která lze připojit ke kovovým trubkám pomocí hadicových svorek. Spodní povrch je vyztužen, aby se odstranila jakákoli vyboulení, aby byla dostatečná oblast kontaktu mezi spodním povrchem airbagu a pěnovou vrstvou.

Pružinové ventily udržují minimální tlak v airbagu do dopadu kapsle, což následně vede ke zvýšení tlaku uvnitř airbagu, který nakonec ventily otevře. Po snížení tlaku uvnitř airbagu se vývody zavřou pod napětím pružiny. Uzavírací ventily poskytují aktivní kontrolu nad zavíráním odvzdušňovací oblasti. Ventil je normálně udržován otevřený a výstupní strana je uzavřena elektromagnetickým uzavíracím víkem. Elektromagnet je bez napětí těsně před nárazem. Následný nárůst tlaku v airbagu otevírá víko a uvolňuje vzduch. Poté následuje uzavření ventilu načasované tak, aby bylo dosaženo požadovaného zpomalení bez jakýchkoliv odrazů.

Aby byl systém kompatibilní pro kapsle o různých hmotnostech, je pro stejnou hodnotu zpomalení používána matice inflačního tlaku a počáteční odvzdušňovací plocha. Ventily lze selektivně použít v závislosti na hmotnosti kapsle. K vývoji této matice se používá číselný kód [2].

3.6. National Microgravity Laboratory - China (NMLC):

Věda o mikrogravitaci a její aplikaci je velmi důležitou součástí čínského vesmírného programu. Tato oblast byla v posledních letech velmi aktivní spolu s mezinárodními kosmickými aktivitami a má mnoho důležitých výsledků. Dokončení a provoz Mezinárodní vesmírné stanice bude dále podporovat výzkumné činnosti v oblasti mikrogravitace a její aplikace. Národní mikrogravitační laboratoř v Číně (National Microgravity Laboratory – China) (NMLC) byla založena v polovině 90. let. Pádová věž je jedním z hlavních experimentálních zařízení NMLC. Na Obr. 18 je možné vidět věž zvenčí. Je vysoká 116 m a nachází se na jihovýchodě centrální oblasti Zhongguancun v Pekingu. Věž je součástí rozsáhlého výzkumu v oblasti mikrogravitace [19].



Obr. 18.: Pádová věž NMLC [19]

Tabulka 8.: Parametry pádové věže NMLC [19]

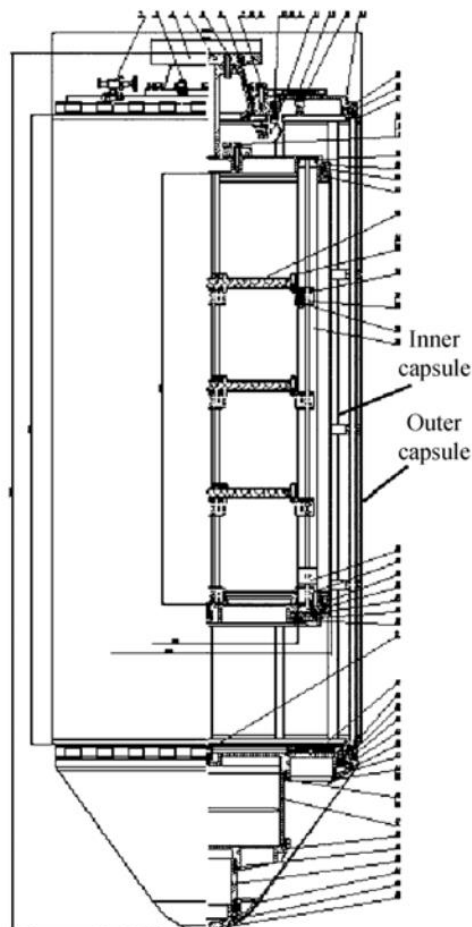
National Microgravity Laboratory – China (NMLC)	
Délka volného pádu	83 m
Doba trvání mikrogravitace	3,5 s
Rychlost dopadu	34 m/s
Hodnota mikrogravitace	10^{-5} g
Parametry kapsle	
Celková hmotnost kapsle	630 kg
Parametry brzdného systému	
Typ brzdného systému	Sít s lanovým systémem
Průměrné brzdné zrychlení	8 g
Maximální brzdné zrychlení	12 g

Pádová věž NMLC se skládá z:

- pádové kapsle
- zpomalovacího zařízení (brzdného systému)
- uvolňovacího mechanismu
- řídicího systému
- systému sběru dat
- pomocných zařízení

3.6.1. Pádová kapsle

Schematický výkres sestavy pádové kapsle je znázorněn na Obr. 19. Sestava kapsle se skládá z vnější kapsle, která slouží jako aerodynamický štít a vnitřní kapsle, ve které se nachází experimentální náklad. Prostor mezi vnitřní kapslí a vnější kapslí je evakuován. Vnější kapsle (aerodynamický štít) je spouštěná za normálních atmosférických podmínek. Osově symetrický aerodynamický obrys s nízkým součinitelem odporu byl navržen tak, aby snížil odpor vzduchu během volného pádu. Celá sestava pádové kapsle je při zpomalování vystavena velkému šoku. Podle požadavků hlavního návrhu by vnější kapsle měla být navržena jako lehká, tenká a tlakotěsná skořepina.



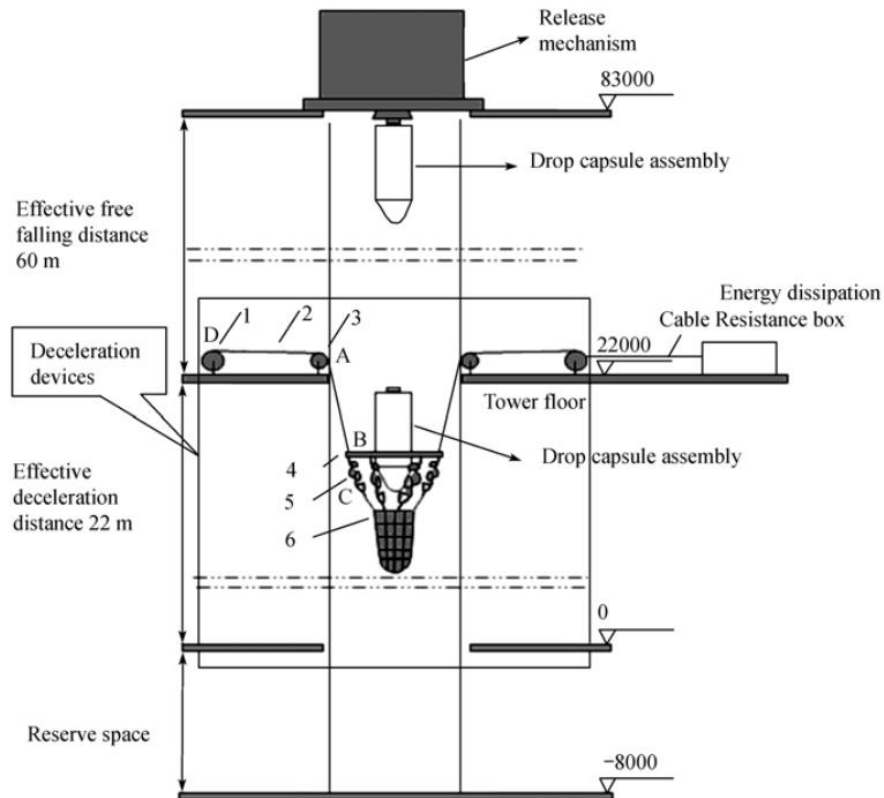
Obr. 19.: Schéma pádové kapsle [19]

Vnitřní kapsle, nesoucí experimentální náklad, během pádu volně padá do vnější kapsle. Relativní rychlost mezi vnitřní a vnější kapslí je velmi malá (<1 m/s). Vzhledem k vakuovému prostředí a nízké relativní rychlosti je odpor vzduchu působící na vnitřní kapsli velmi malý. Úroveň mikrogravitace experimentálního nákladu tak může dosáhnout hodnoty 10^{-5} g nebo lepší [29].

3.6.2. Zadržný systém:

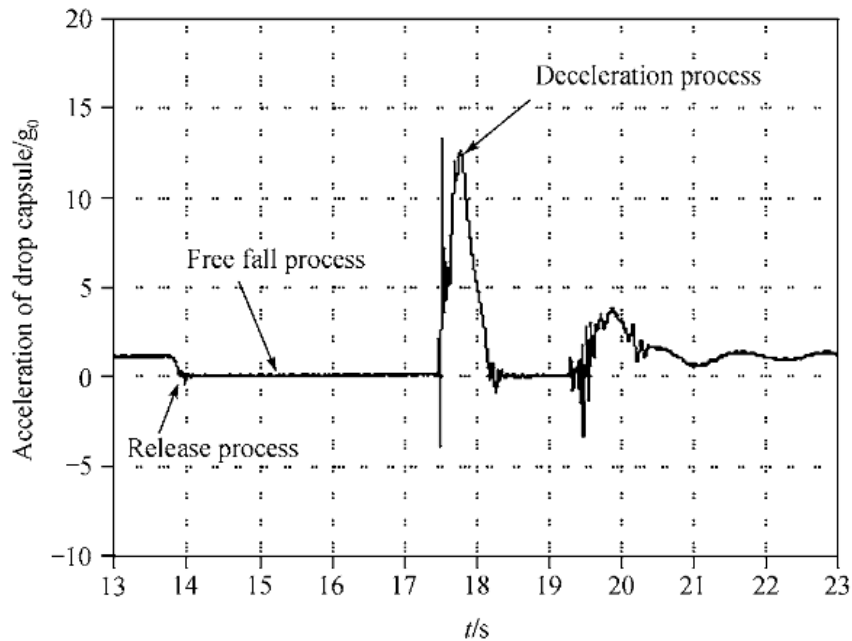
V zařízení NMLC se ke zpomalení a následnému zastavení kapsle používá jedinečné elastické ovládací zpomalovací zařízení. Skládá se ze tří-konektorového reverzibilního mechanického/elektrického energetického snímače (STS), ocelového kabelu, ocelového kroužku, vyztužené síťové sestavy, vyztužené sestavy elastických gumových strun, odporové skříně proti rozptýlu energie, řídicí jednotky počítače a nádoby s kuličkami expandovaného polystyrenu na nouzové zpomalení atd. (Obr. 20). Pracovní proces a princip jsou popsány takto:

1. STS (motorická funkce) vynese ocelový kroužek, sestavu gumových strun a síťovou sestavu do předem stanovené výšky. Celá sestava tam zůstane a čeká na příkaz.
2. Celá sestava začne padat kvůli vlastní hmotnosti po příkazu počítače, předtím než do ní pádová kapsle dopadne. Mezitím je STS (funkce generátoru) tažena síťovou sestavou a vyrábí elektřinu rozptýlenou odporovou skříní. Tímto se STS otočí, když se kapsle dotkne sítě pro snížení šoku, kterému je STS vystaven.
3. Jakmile do síťové sestavy spadne kapsle o hmotnosti 600–630 kg rychlostí ~ 34 m/s, tak se kapsle zpomaluje a sestava sítě zrychluje. Mezitím se sestava gumových strun natahuje, aby se převedla kinetická energie kapsle na elastickou potenciální energii, která se dočasně „uloží“. Mezitím se STS zrychluje, zatímco je taženo rychle padající sestavou sítě a část kinetické energie kapsle se tím převádí na elektrickou energii rozptýlenou odporovou skříní.



Obr. 20.: Schéma brzdného systému – 1. STS, 2. ocelový kabel, 3. vodící kolo, 4. ocelový kroužek, 5. vyztužená sestava elastických gumových strun, 6. vyztužená síťová sestava [19]

4. Jakmile je převedená rychlost STS vyšší než rychlost pádu síťové sestavy, sestava gumových strun se začne smršťovat a uvolní uloženou elastickou potenciální energii. Mezitím se kapsle dále zpomaluje.
5. Jakmile rychlost pádu kapsle klesne na nulu, je kapsle dočasně ve statickém stavu. Mezitím sestava sítí stále klesá a STS se stále otáčí relativně vysokou rychlostí.
6. Pádová kapsle opět volně padá. Mezitím STS převádí svou vlastní kinetickou energii a kinetickou energii padající síťové sestavy a kapsle na elektrickou energii rozptýlenou odporovou skříní. STS dále zpomaluje.
7. Pádová kapsle je opět ve statickém stavu.
8. Zpomalovací zařízení jsou v brzdovém stavu na základě příkazu počítače. Následně kapsle a sestava sítí padají velmi hladce a pomalu. Nakonec se zastaví na konečném místě. Proces zpomalení a zastavení je tím zcela dokončen. Celý proces zpomalení může být jasně vidět z křivky měřené pomocí akcelerometru (Obr. 21) [19].



Obr. 21.: Měřená křivka zpomalení – na ose X je čas (s) a na ose Y je zrychlení pádové kapsle (g_0) [19]

Koeficient pružnosti gumových strun, délka sestavy gumových strun a odpor odporové skříně jsou tři nezávislé parametry. Primární hodnoty těchto tří nezávislých parametrů byly zvoleny numerickou analýzou. Vzhledem k tomu, že sestava gumových strun se skládá z 96 strun a každá gumová struna se skládá z 250 jednotlivých vláken, je elastický odpor působící na kapsli nastavitelný přiměřeným výběrem počtu gumových strun a délky gumových strun. Teoreticky by se odpor odporové skříně mohl neustále měnit tak, aby splňoval požadavky různých stavů procesu zpomalování.

Nejdůležitějším technickým problémem, který musí být zcela vyřešen, je to, že pohyb kapsle "směrem nahoru" není během procesu zpomalování povolen. To znamená, že při zpomalování kapsle z rychlosti ~ 34 m/s na 0 m/s následně není povolen pohyb kapsle směrem nahoru (tedy směrem proti směru pohybu kapsle během pádu).

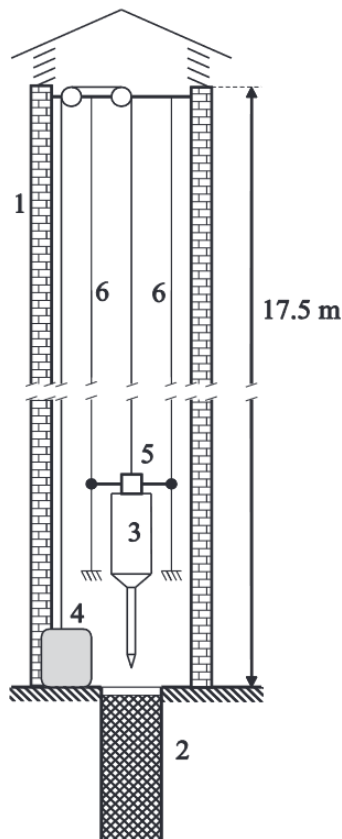
Není-li kombinace mezi koeficientem pružnosti sestavy gumových strun, délkou sestavy gumových strun a odporem odporové skříně vyhovující, může být kapsle vystřelena směrem nahoru sestavou gumových strun, což pravděpodobně povede k potížím v procesu zpomalení.

V procesu seřizování byly v zájmu bezpečnosti nejprve vybrány tyto tři nezávislé parametry na základě numerické analýzy, následně se délka pádu ΔH postupně měnila od 1, 3, 5, 8, 10 a 15 m až do 64 m. Každá délka pádu ΔH má odpovídající skupinu těchto tří parametrů. Nakonec tímto byl problém "pohybu vzhůru" dobře vyřešen. Současná přijatelná celková hmotnost pádové kapsle se pohybuje od 600 kg do 630 kg [19].

3.7. IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid

Pádová věž umístěná v IDR/UPM byla postavena na místě vyřazeného větracího komína od střechy budovy až po spodní patro. Tento komín je vysoký 17,5 m, i když díky geometrickým omezením je efektivní výška pro volný pád snížena na 13,15 m (pro zpomalovací systém jsou zapotřebí 2 m a kapsle je vysoká 2,35 m). Téměř veškeré vybavení potřebné pro provoz pádové věže je umístěno v řídicí místnosti ve spodním patře.

Jak je načrtnuto na Obr. 22, pádová věž se skládá z komína (jehož průřez má rozměr zhruba 1 m x 1 m), výtahového systému, kapsle a zpomalovacího zařízení. Komín je vybaven různými CCD kamerami, které umožňují vizualizaci různých prvků umístěných uvnitř a osvětlovacím systémem. Výtahový systém je naviják vybavený stejnosměrným elektromotorem s potřebnými ovládacími zařízeními pro pohyb uvolňovacího mechanismu nahoru a dolů. Naviják je umístěn ve spodní části komína a je připojen k uvolňovacímu mechanismu pomocí kabelu a vhodného kladkového systému. Uvolňovací mechanismus se skládá z elektromagnetického zámku namontovaného k vodorovné tyči, která je připevněná ke zvedacímu kabelu. Aby se zabránilo rotaci kapsle během fáze zvedání, okraje vodorovné tyče kloužou na svislých ocelových kabelech, z nichž každý vede z horní části věže až do spodní části. Tyto ocelové kabely se také používají k napájení uvolňovacího mechanismu elektrickou energií [20].



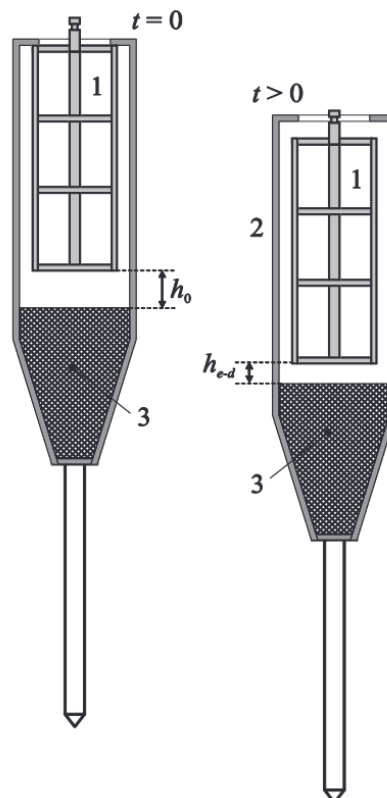
Obr. 22.: Schéma pádové věže v IDR/UPM - 1. komín, 2. nádoba s pískem, 3. kapsle, 4. výtahový systém, 5. uvolňovací mechanismus, 6. lanové vedení [20]

Pomocí tohoto systému lze náklad umístit do jakékoli výšky mezi $h = 0$ a $h = 13$ m, čímž je doba volného pádu řízena výškou, ze které se kapsle uvolní. Pro přesné změření výšky je pádová věž vybavena laserem pro měření vzdálenosti [30].

3.7.1. Pádová kapsle

Kapsle je tvořena ze dvou částí, aerodynamického štítu a platformy pro experiment. Experimentální platforma měří 250 mm v průměru a je vysoká 600 mm a je schopna nést experimentální aparaturu o maximální hmotnosti 15 kg. Na všechny objekty namontované na experimentální platformě působí podmínky snížené gravitace.

Na začátku každého testu je kapsle navinuta na vrchol věže a zavěšena z uvolňovací mechanismu. Uvolňovací mechanismus je „odemčen“ a experiment se uvolní, aby mohl volně padat do spodní části věže, kde je zpomalen velkým hrotem, který pronikne do nádrže se suchým pískem. Během pádu je experimentální platforma uzavřena uvnitř aerodynamického štítu, jak je znázorněno na Obr. 23. Tím je experiment chráněn před účinky aerodynamického odporu a velkými zpomalovacími silami. Vynikající úrovně snížené gravitace lze dosáhnout pomocí aerodynamického štítu [30].



Obr. 23.: Schéma experimentální platformy (1) a aerodynamického štítu (2) v okamžiku uvolnění ($t=0$) a během pádu ($t>0$), (3) představuje pěnu [20]

Experimentální platforma je složená ze čtyř obdélníkových svislých tyčí, které oddělují čtyři kruhové desky (Obr. 24). V prostorách mezi deskami jsou rozložena experimentální zařízení.



Obr. 24.: Fotografie konstrukce kapsle - 1. CCD kamera, 2. osvětlení, 3. experimentální náklad, 4. zrcadlo [20]

3.7.2. Zadržný systém

Aerodynamický štít je vyroben z hliníkového válcového krytu o tloušťce 0,5 mm, hliníkového komolého kužele a ocelového hrotu používaného ke zpomalení celé kapsle. Kužel společně s částí válcového krytu jsou naplněny pěnou, jejíž cílem je co nejvíce snížit působení brzdících sil na experimentální platformu. Hrot je přišroubován ke spodní části komolého kužele. V případě, že při provedení experimentu je vzdálenost pádu dostatečně malá, lze zanedbat odporové síly působící na platformu, díky čemuž může být hrot také přímo přišroubován k experimentální platformě. V opačném případě je nutné použít aerodynamický štít [20].

Tabulka 9.: Parametry pádové věže v IRD/UPM [20]

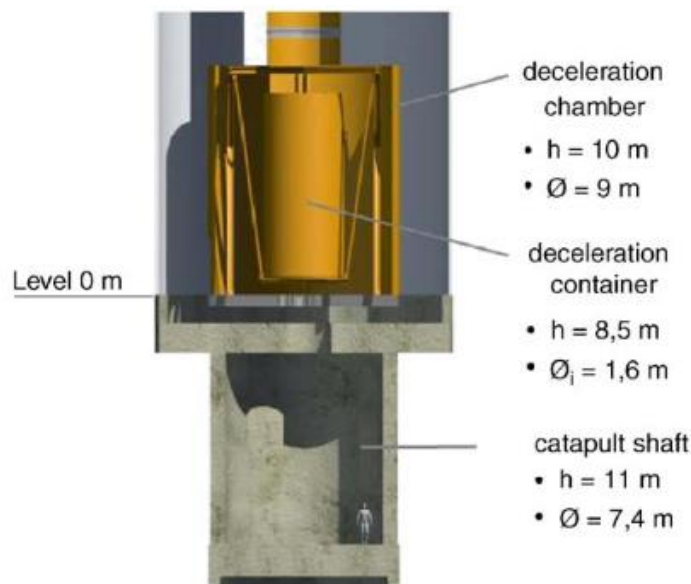
IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid	
Maximální délka volného pádu	13,15 m
Maximální doba trvání mikrogravitace	1,6 s
Hodnota mikrogravitace	10^{-3} g
Parametry kapsle	
Výška kapsle	2,35 m
Výška experimentální platformy	600 mm
Průměr experimentální platformy	250 mm
Hmotnost nákladu	15 kg
Parametry brzdného systému	
Typ brzdného systému	Zapichovací hrot
Maximální brzdné zrychlení	22 g

4. Porovnání zádržných systémů

4.1. Polystyrenové kuličky:

Tento brzdný systém je používán v pádové věži v Brémách (ZARM) a v pádové věži v Glenově výzkumném středisku NASA (NASA Glenn research centre), konkrétně ve výzkumném zařízení nulové gravitace (Zero Gravity Research Facility). Polystyrenové kuličky jsou uloženy v nádobě, která je umístěná ve spodní části věže.

V pádové věži v Brémách je tato nádoba uložena ve zpomalovací komoře o výšce 10 metrů a průměru 9 metrů. Samotná nádoba má tvar komolého kužele o nejmenším průměru 1,6 metrů a je vysoká 8,5 metrů (Obr. 25). Na kapsli padající do nádoby rychlostí až 175 km/h zde působí maximální zpomalení o velikosti 50 g a náraz kapsle trvá okolo 200 milisekund.



Obr. 25.: Schéma spodní části pádové věže v Brémách [15]

V pádové věži ve výzkumném zařízení nulové gravitace (Zero Gravity Research Facility) je brzdná nádoba naplněná expandovanými polystyrenovými kuličkami o průměru 3 milimetry. Nádoba je vysoká téměř 6,1 metrů a její průměr činí 3,3 metrů. Kapsle padá do nádoby rychlostí 50,5 m/s a je zastavena ve hloubce okolo 4,6 metrů. Maximální hodnota zpomalení působící na kapsli je okolo 65 g.

Hlavní výhodou použití polystyrenových kuliček je jednoduchost tohoto brzdného systému. Avšak hlavní nevýhodou je nutnost dostatečného prostoru pro nádobu, ve které jsou kuličky. Z tohoto důvodu se tento brzdný systém používá převážně ve vysokých pádových věžích. Další nevýhodou tohoto systému je náročnost vyjmutí kapsle z nádoby a nutnost očištění kapsle po provedení experimentu.

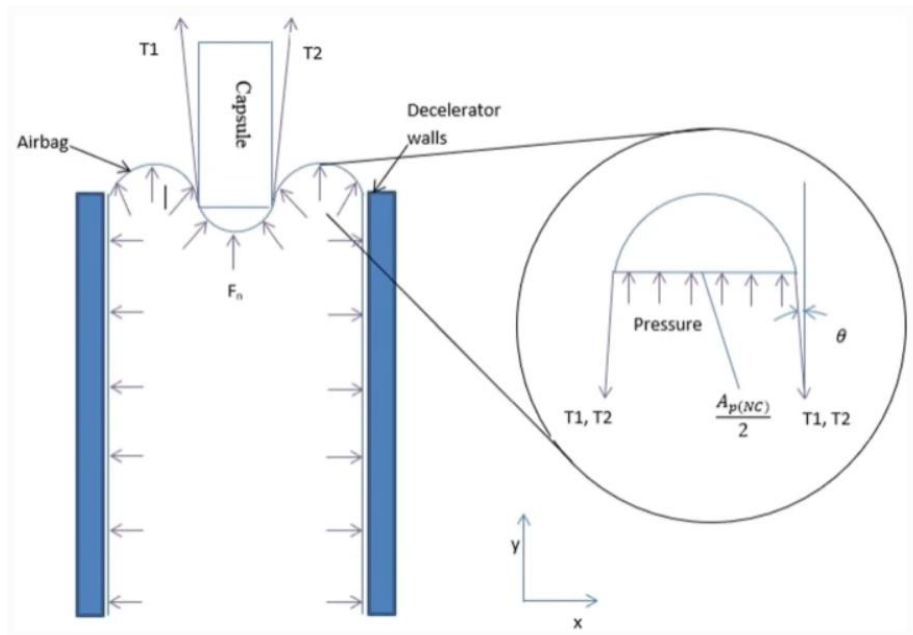
4.2. Airbag

Airbag se k zastavení kapsle používá v pádové věži 2,2 Second Drop Tower v Glenově výzkumném středisku (NASA Glenn research centre), dále v pádové věži nacházející se na Queensland University of Technology (QUT) v Austrálii a v pádové věži v Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras).

V pádové věži 2,2 Second Drop Tower je airbag používán k zastavení kapsle padající z výšky 24 metrů po dobu 2,2 sekund.

Ve věži v QUT je používána inovativní metoda zpomalení kapsle na konci testu. Používá se zde odvětrávaný airbag, který je schopen absorbovat velké množství kinetické energie. Řízené odvětrávání vzduchu také zajišťuje bezpečné a rychlé zastavení kapsle. Náraz kapsle trvá okolo 0,25 sekund a maximální hodnota zpomalení působící na kapsli je 25 g. Kapsle padá po dobu 2,0 sekund z výšky 23,5 metrů.

V pádové věži IIT Madras se používá airbag válcového tvaru (Obr. 26). Kapsle zde padá z výšky 30,5 metrů po dobu 2,5 sekund. Při dopadu do brzdného systému působí na kapsli maximální zpomalení o velikosti 20 g.



Obr. 26.: Schéma airbagu [28]

Hlavní výhodou při použití nafukovacího airbagu jako brzdného systému oproti polystyrenovým kuličkám je jeho velikost. Vzhledem k tomu že zabírá méně prostoru než nádoba s polystyrenovými kuličkami, jeví se být jako lepší volba k použití v menších pádových věžích. Další výhodou je jednodušší vyjmutí a manipulace kapsle po provedení experimentu. Nevýhodou tohoto brzdného systému však je vyšší pořizovací cena za vzduchotechniku potřebnou k nafukování a vyfukování airbagu.

4.3. Síť s lanovým systémem

Tento systém je používán v pádové věži NMLC v Pekingu. Kapsle o hmotnosti 600-630 kg dopadne do síťové sestavy rychlostí 34 m/s. Kapsle padá z výšky 83 metrů po dobu 3,5 sekund a maximální hodnota zpomalení při dopadu do brzdného systému je 12 g (průměrná hodnota je rovna 8 g).

Hlavní výhodou je možnost nastavení tuhosti celého brzdného systému. Díky tomu je možné dosáhnout mnohem nižších hodnot zpomalení při dopadu kapsle, než je tomu u jiných brzdných systémů. Tento brzdný systém však musí být uložen v dostatečné výšce nad zemí, což se jeví jako hlavní nevýhoda tohoto systému. Například u pádové věže NMLC je síťový systém uložen ve výšce 22 metrů nad zemí, přičemž kapsle padá z výšky 83 metrů. Další nevýhodou je složitost celého systému při jeho obsluze a montáži a pravděpodobně i pořizovací cena.



Obr. 27.: Fotografie lanového systému s kapslí v pádové věži NMLC [31]

4.4. Zapichovací hrot

Jedná se o systém používaný v pádové věži v IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid. Kapsle s nákladem o maximální hmotnosti 15 kg zde padá z výšky 13,15 m po dobu 1,6 s. Princip fungování tohoto brzdného systému spočívá v tom, že zapichovací hrot, který je přišroubován ke spodní části kapsle, se na konci pádu zabodne do nádoby se suchým pískem, která je uložena ve spodní části věže, čímž se kapsle zpomalí a nakonec zastaví. Zapichovací hrot je přišroubován ke spodní části aerodynamického štítu, který má tvar komolého kužele. Maximální brzdné zrychlení působící na kapsli je rovno 22 g.

Hlavní výhodou tohoto systému je především jeho jednoduchost. Vzhledem k tomu že se jedná o pasivní zádržný systém, je jeho obsluha velmi jednoduchá. U vysokých pádových věží nebo u těžkých experimentů je použití tohoto brzdného systému nevhodné, protože by docházelo k příliš vysokým hodnotám přetížení při zpomalování a zastavení kapsle. Proto je toto řešení vhodné především u menších pádových věží s nízkou hmotností kapsle. Další nevýhodou tohoto systému je ovládání přetížení při nárazu kapsle, které lze měnit pouze tvarem hrotu.

4.5. Deformační prvek

Jako brzdny systém by teoreticky bylo možné použít i deformační prvek (např. deformační aerodynamický štít), který by při nárazu pohltil veškerou kinetickou energii a tím kapsli zastavil. Jedná se o velmi jednoduchý pasivní zádržný systém, u kterého není nutná žádná další konstrukce nebo dopadový prostor, který by zabíral více místa jako tomu je u většiny dnešních pádových věží. Tudíž by jeho konstrukce a obsluha mohla být velmi jednoduchá. Avšak hlavní nevýhodou tohoto systému je deformace prvku na konci každého pádu, díky čemuž se musí tento prvek po každém pádu vyměnit či opravit. Další nevýhodou tohoto řešení je absence ovládání přetížení při nárazu kapsle, které lze měnit pouze tvarem deformačního prvku. Také nelze u tohoto systému zaručit bezpečí experimentální platformy během nárazu kapsle, tudíž pravděpodobnost rozbití či poničení experimentu nebo zařízení pro měření dat by u tohoto systému mohla být vyšší, než je tomu u jiných zádržných systémů. Nepodařilo se mi dohledat žádnou pádovou věž, ve které by se používal tento systém, nebo systém tomu podobný ke zpomalení a zastavení kapsle.

4.6. Raketový motor

Teoreticky by mělo být možné použít ke zpomalení a následně zastavení pádové kapsle raketový motor. Princip tohoto systému by spočíval v tom, že by se ke spodní části kapsle připevnil raketový motor, který by se v určité výšce nad zemí zažehnul a díky tahu, který motor vyprodukuje by se mohla kapsle zpomalit a následně zastavit. Takovýto systém zatím není používán v pádových věžích (resp. se mi nepodařilo dohledat žádnou pádovou věž, kde by se takovýto systém používal), ale podobný systém je používán společností Space X ke zpomalení a následně zastavení jednotlivých stupňů raket, které se oddělí od nosné rakety.

4.7. Výběr vhodného systému pro použití na ČVUT

Při výběru vhodného zádržného systému uvažuje pouze systémy, které se již používají v pádových věžích, a to především z důvodu již jejich ověřené funkčnosti v provozu.

Při výběru vhodného zádržného systému se řídím především požadavky ze zadání této diplomové práce. První požadavek je, aby byl systém použitelný pro pádovou kapsli o hmotnosti 5 až 20 kg, rychlosti dopadu 10 až 25 m/s a průměru platformy s experimentem 200 až 300 mm (+ aerodynamický kryt). Dále by brzdné zrychlení působící na experiment při nárazu nemělo překročit 50 g (optimálně do 30 g). Také by bylo vhodné, aby konstrukce a obsluha zádržného systému byla co nejjednodušší a aby samotný systém byl co nejvíce spolehlivý.

Na základě těchto požadavků jsou primární kritéria pro výběr vhodného zádržného systému celková hmotnost pádové kapsle, hodnota maximálního brzdného zrychlení, jednoduchost konstrukce zádržného systému, jednoduchost obsluhy zádržného systému a spolehlivost systému.

4.7.1. Hmotnost pádové kapsle

První kritérium pro určení vhodného zádržného systému pro použití na ČVUT je hmotnost pádové kapsle. Předpokládá se, že na ČVUT bude používaná kapsle o hmotnosti 5 až 20 kg. Tabulka 10 porovnává hmotnosti pádových kapslí a brzdných systémů používaných v různých pádových věžích. Z těchto dat lze vyčíst, že nejvíce podobnou hmotnost pádové kapsle na ČVUT (5 až 20 kg) má pádová kapsle používaná v pádové věži v IDR/UMP (15 kg). V této pádové věži je ke zpomalení a zastavení kapsle používán systém zapichovacího hrotu. Z tohoto důvodu je pro použití na ČVUT nejvhodnější použití zapichovacího hrotu.

Druhý nejvhodnější řešení by bylo použití airbagu, ale tento systém se již používá pro pádové kapsle o mnohem vyšší hmotnosti (cca 400 až 600 kg), tudíž by již tento systém nebyl vhodný pro použití na ČVUT. Síť s lanovým systémem má podobný problém jako airbag, jelikož se používá pro kapsle o hmotnosti 600 až 630 kg. Z tohoto důvodu se jedná o spíše nevhodné řešení. Nejméně vhodné je použití nádoby s polystyrénovými kuličkami, jelikož se tento systém používá pro pádové kapsle o hmotnosti 400 až 1130 kg.

Na základě tohoto kritéria je vhodnost použití zádržných systémů pro pádovou věž na ČVUT v tomto pořadí:

1. Zapichovací hrot
2. Airbag
3. Síť s lanovým systémem
4. Nádob s polystyrénovými kuličkami

Tabulka 10.: Porovnání hmotností kapslí a zádržných systémů v pádových věžích

Název zařízení	Maximální hmotnost pádové kapsle	Zádržný systém
Pádová věž v Brémách – ZARM	500 kg (400 kg)	Polystyrenové kuličky
NASA 2,2 Second drop tower	487 kg	Airbag
NASA Zero G research facility	1130 kg	Polystyrenové kuličky
Pádová věž v QUT	Hmotnost nákladu 150 kg	Airbag
Pádová věž v IIT Madras	600 kg	Airbag
Pádová věž NML China	630 kg	Sít s lanovým systémem
Pádová věž v IDR/UPM	15 kg	Zapichovací hrot

4.7.2. Maximální brzdné zrychlení

Jako další kritérium zádržného systému na ČVUT je hodnota maximálního brzdného zrychlení. Maximální hodnota brzdného zrychlení, které působí na pádovou kapsli při nárazu nesmí překročit 50 g (optimálně 30 g). Tabulka 11 porovnává hodnoty maximálního brzdného zrychlení a zádržných systémů jednotlivých pádových věží.

Z této tabulky lze vyčíst, že nejnižší hodnota maximálního brzdného zrychlení působícího na kapsli při nárazu je v pádové věži NML China (12 g), ve které se používá síť s lanovým systémem. V pádových věžích, ve kterých se ke zpomalení a zastavení kapsle používá airbag, dosahuje průměrná hodnota maximálního brzdného zrychlení 25 g (NASA 2,2 second drop tower – 30 g; pádová věž v QUT – 25 g; pádová věž v IIT Madras – 20 g). V pádové věži v IDR/UPM se používá k zastavení kapsle zapichovací hrot a hodnota maximálního brzdného zrychlení působícího na kapsli je zde 22 g. Nejvyšších hodnot brzdného zrychlení 50 g až 65 g je dosaženo v pádových věžích, ve kterých se jako zádržný systém používá nádoba s polystyrenovými kuličkami (pádová věž v Brémách – 50 g; NASA Zero G research facility – 65 g).

Na základě tohoto kritéria jsou vhodné pro použití v pádové věži na ČVUT zádržné systémy v tomto pořadí (1 – nejnižší hodnota maximálního přetížení; 4 – nejvyšší hodnota maximálního přetížení):

1. Síť s lanovým systémem
2. Zapichovací hrot
3. Airbag
4. Nádoba s polystyrenovými kuličkami

Tabulka 11.: Porovnání maximálního brzdného zrychlení jednotlivých pádových věží

Název zařízení	Maximální brzdné zrychlení	Zádržný systém
Pádová věž v Brémách – ZARM	50 g	Polystyrenové kuličky
NASA 2,2 Second drop tower	30 g	Airbag
NASA Zero G research facility	65 g	Polystyrenové kuličky
Pádová věž v QUT	25 g	Airbag
Pádová věž v IIT Madras	20 g	Airbag
Pádová věž NML China	12 g	Sít s lanovým systémem
Pádová věž v IDR/UPM	22 g	Zapichovací hrot

4.7.3. Jednoduchost (složitost) konstrukce zádržného systému

Další kritérium zádržného systému pro pádovou věž na ČVUT je jednoduchost (resp. složitost) jeho konstrukce. Cílem je, aby byl použitý co nejjednodušší zádržný systém, který zároveň bude splňovat všechny ostatní požadavky/kritéria.

Z brzdných systémů aktuálně používaných v pádových věžích má nejjednodušší konstrukci nádoba s polystyrénovými kuličkami. Jedná se o pasivní zádržný systém, takže není nutné s ním manipulovat nebo ho ovládat během pádu a nárazu pádové kapsle. Konstrukce samotné nádoby je také velmi jednoduchá. Nádoba může mít válcový tvar nebo tvar komolého kužele, a její rozměry se určí na základě velikosti a hmotnosti pádové kapsle a době trvání volného pádu.

Konstrukce systému se zapichovacím hrotem je o něco složitější v porovnání s nádobou s polystyrénovými kuličkami. Také se jedná o pasivní zádržný systém, avšak je zde nutná konstrukce více částí, a to nádoby se suchým pískem a zapichovacího hrotu. Velikost a tvar hrotu se zvolí na základě požadovaného maximálního přetížení a velikost nádoby s pískem se určí na základě velikosti zapichovacího hrotu.

Konstrukce airbagu je o dost složitější, než je tomu u zapichovacího hrotu nebo nádoby s polystyrénovými kuličkami, a to především kvůli tomu, že se jedná o aktivní zádržný systém. Během volného pádu kapsle je nutné udržovat airbag nafouknutý, a během nárazu kapsle je důležité airbag dostatečně odvdzdušňovat, aby nedošlo k odrazu kapsle a aby bylo dosaženo požadované hodnoty brzdného přetížení. Pro samotnou konstrukci tohoto zádržného systému je potřeba dostatečně velký nafukovací pytel (airbag), čerpadlo, které airbag efektivně nafoukne za přijatelnou dobu, nádoba, ve které bude airbag uložen, ventily pro odvdzdušňování airbagu při nárazu kapsle, elektronika (počítač) pro ovládání nafukování a vyfukování airbagu atd.

Nejsložitější konstrukce je u zádržného systému, u kterého se používá síť s lanovým systémem. Je používán v pádové věži NML China a skládá se ze tří-konektorového reverzibilního mechanického/elektrického energetického snímače (STS), ocelového kabelu, ocelového kroužku, vyztužené síťové sestavy, vyztužené sestavy elastických gumových strun, odporové skříňe proti rozptylu energie, řídicí jednotky počítače a nádoby s kuličkami expandovaného polystyrenu na nouzové zpomalení. Hlavní výhodou tohoto systému je možnost nastavení tuhosti celého systému a tím i brzdného přetížení, avšak díky složitosti této konstrukce je tento systém nevhodný pro použití v pádové věži na ČVUT.

Na základě těchto poznatků je jednoduchost konstrukce zádržných systémů pro použití v pádové věži na ČVUT v tomto pořadí (1 – nejjednodušší konstrukce; 4 – nejsložitější konstrukce):

1. Polystyrenové kuličky
2. Zapichovací hrot
3. Airbag
4. Síť s lanovým systémem

4.7.4. Jednoduchost obsluhy zádržného systému

Jednoduchost obsluhy zádržného systému je závislá na typu zádržného systému (aktivní či pasivní) a na jednoduchosti jeho konstrukce. Pasivní systémy se obsluhují mnohem jednodušeji než systémy aktivní.

Mezi pasivní zádržné systémy patří nádoba s polystyrénovými kuličkami a zapichovací hrot. U nádoby s polystyrénovými kuličkami je obsluha o něco složitější než u zapichovacího hrotu, a to především díky tomu, že při pádu kapsle do nádoby z ní vyletí polystyrénové kuličky do okolí. Dále je u nádoby s polystyrénovými kuličkami náročnější vyjmutí kapsle, než je tomu u systému se zapichovacím hrotem. Z tohoto důvodu je obsluha zapichovacího hrotu jednodušší.

U aktivních zádržných systému je obsluha složitější již před provedením experimentu, protože je nutné systémy seřadit na základě hmotnosti nákladu, na kterém bude proveden experiment. Mezi aktivní zádržné systémy patří airbag a síť s lanovým systémem. U sítě s lanovým systémem je seřízení celého systému složitější než u airbagu, a to především díky mnohem složitější konstrukci. Z tohoto důvodu je obsluha airbagu jednodušší než obsluha u sítě s lanovým systémem.

Na základě těchto poznatků je vhodnost použití zádržných systémů v pádové věži na ČVUT v tomto pořadí (1 – nejjednodušší obsluha; 4 – nejsložitější obsluha):

1. Zapichovací hrot
2. Nádoba s polystyrénovými kuličkami
3. Airbag
4. Síť s lanovým systémem

4.7.5. Spolehlivost zádržného systému

Spolehlivost systémů je závislá na jednoduchosti jejich konstrukce. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že pasivní zádržné systémy (nádoba s polystyrénovými kuličkami, zapichovací hrot) budou spolehlivější než aktivní zádržné systémy (airbag, síť s lanovým systémem). Navíc v pádových věžích s aktivními zádržnými systémy se většinou používají záložní pasivní systémy. Např. v pádové věži NML China se jako primární systém používá síť s lanovým systémem a jako záložní/nouzový systém je zde používána nádoba s polystyrénovými kuličkami. V pádové věži IIT Madras je používán systém s airbagem, který je pro zvýšení bezpečnosti podložen sestavou pěnových desek.

U pasivních zádržných systémů lze předpokládat, že nádoba s polystyrénovými kuličkami bude spolehlivější než zapichovací hrot, a to především díky jednodušší konstrukci (u zapichovacího hrotu je konstrukce tvořená více díly, než je tomu u nádoby s polystyrénovými kuličkami, díky čemuž klesá spolehlivost celého systému).

U aktivních zádržných systémů lze předpokládat, že díky méně složité konstrukci bude systém s airbagem spolehlivější než síť s lanovým systémem.

Na základě tohoto kritéria je vhodnost použití zádržných systémů v pádové věži na ČVUT v tomto pořadí (1 – nejvíce spolehlivý systém; 4 – nejméně spolehlivý systém):

1. Nádob s polystyrénovými kuličkami
2. Zapichovací hrot
3. Airbag
4. Síť s lanovým systémem

4.7.6. Souhrn všech kritérií

Vzhledem k tomu, že každý systém má svoje výhody i nevýhody a každý ze systémů splňuje různé požadavky, rozhodl jsem se pro výběr vhodného systému k pádové věži na ČVUT použít bodovou tabulku (Tabulka 12). Jako hlavní kritéria jsem si stanovil hmotnost pádové kapsle, maximální brzdné zrychlení, jednoduchost konstrukce, jednoduchost obsluhy a spolehlivost jednotlivých systémů. Každý systém je ohodnocen od 1 do 4 na základě jejich vhodnosti u každého kritéria (1 – nejlepší; 4 – nejhorší). Každý kritérium je také obodováno od 1 do 10 podle jejich důležitosti (10 – nejdůležitější; 1 – nejméně důležitý).

Tabulka 12.: Bodová tabulka pro výběr vhodného zádržného systému

Systém/Kritérium	Hmotnost	Zrychlení	Konstrukce	Obsluha	Spolehlivost	Suma	Pořadí
Polystyrénové k.	4	4	1	2	1	3,03	2.
Airbag	2	3	3	3	3	3,57	3.
Síť s lanovým sys.	3	1	4	4	4	3,93	4.
Zapichovací hrot	1	2	2	1	2	2,07	1.
Expert/Kritérium	K1	K2	K3	K4	K5	Suma	
E1	7	10	9	8	8	42	
Váha kritéria	0,21	0,30	0,27	0,24	0,24	1,26	

Po přiřazení pořadí jednotlivým variantám vychází nejlépe zádržný systém se zapichovacím hrotem. Tento systém je používán v pádové věži IDR/UPM s kapslí o hmotnosti 15 kg, dosahuje maximálního brzdného zrychlení 22 g a konstrukce a obsluha tohoto systému je jednodušší v porovnání s ostatními variantami, tudíž se jedná o vhodný zádržný systém pro pádovou věž na ČVUT, který splňuje veškeré požadavky.

5. Současný stav pádové věže na ČVUT

V prostorách ČVUT zatím neexistuje zařízení pro zkoumání účinků mikrogravitace. Základní idea je taková, že v areálu ČVUT na Karlově náměstí se nachází nepoužívaný komín (Obr. 28), který by bylo možné upravit na pádovou věž.



Obr. 28.: Fotografie komína v areálu ČVUT na Karlově náměstí

Komín je vysoký 28 m, vnitřní průměr v horní části je 1,2 m a vnitřní průměr ve spodní části je 1,5 m.

V současné době existuje většina systémů pro fungování pádové věže na ČVUT pouze ve formě teoretických návrhů.

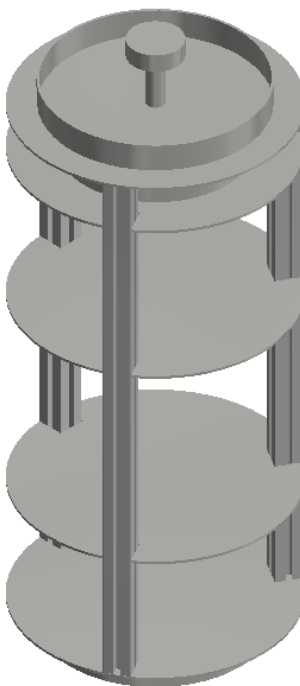
6. Teoretický návrh konstrukce zádržného systému

Na základě porovnání zádržných systémů používaných v pádových věžích je nejvhodnější pro použití v pádové věži na ČVUT systém se zapichovacím hrotem. Pro fungování tohoto systému je zapotřebí návrh zapichovacího hrotu, který bude připevněn ke spodní části pádové kapsle, a návrh nádoby se suchým pískem, do které se na konci pádu zapichovací hrot zabodne.

Pro návrh této konstrukce by bylo vhodné znát rozměry pádové kapsle. Vzhledem k tomu, že nebude možné využít vakuovou komoru z ekonomických a konstrukčních důvodů, která by snížila odpor padající kapsle, bude nutné použít ke snížení odporu aerodynamický štít. Avšak jediný rozměr, který je známý ze zadání je průměr experimentální plošiny (200–300 mm). Bylo by vhodné znát také výšku experimentální platformy, na jejímž základě lze určit rozměry aerodynamického štítu, ke kterému bude zapichovací hrot připevněn. Aby byl odpor vzduchu působící na aerodynamický štít během pádu co nejnižší, uvažuji že aerodynamický štít bude převážně válcového tvaru. Z tohoto důvodu bude i experimentální platforma válcového tvaru. Veškeré modely budou namodelovány v programu Autodesk Inventor 2019.

6.1. Experimentální platforma

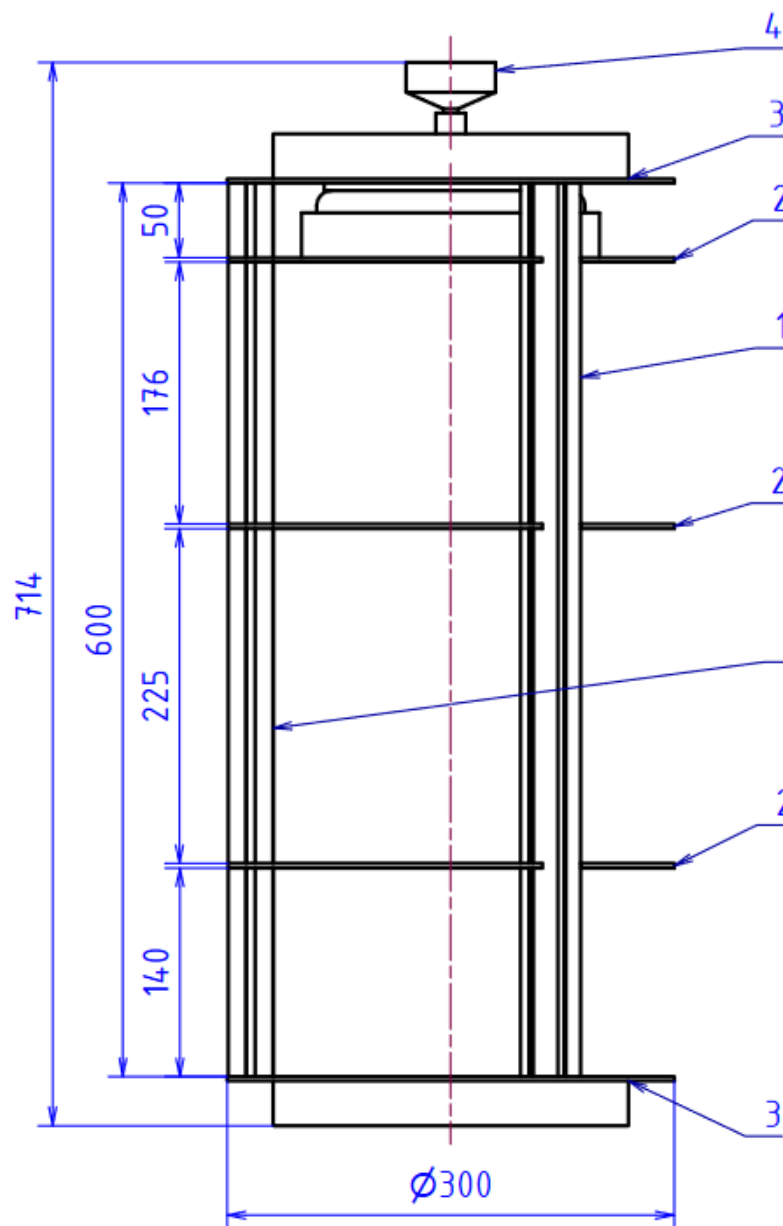
Experimentální platforma (Obr. 29) je část kapsle, ve které je uložen experimentální náklad společně s elektronikou pro měření dat. Je důležité, aby na experimentální náklad během pádu působilo co nejméně vlivů z okolí, především odpor vzduchu. Z tohoto důvodu je experimentální platforma uložena uvnitř aerodynamického štítu.



Obr. 29.: 3D model experimentální platformy

Detaily o konstrukci a rozměrech experimentální platformy jsem získal z diplomové práce pana Snížka [32]. Platforma (Obr. 30) je složena ze 3 sloupků, 3 polic, 2 desek s výztuží (pro horní a spodní část platformy) a koncovky pro vypouštěcí mechanismus. V platformě jsou díky tomu 4 komory (sektory), přičemž jedna z nich je vyhrazena pro části potřebné k vypouštěcímu mechanismu, tudíž zbylé komory poskytují prostor pro experimentální náklad a měřící elektroniku.

Sloupky jsou tvořeny hliníkovými profily o rozměrech 30x30 mm a každý profil je dlouhý 600 mm. Police jsou vyrobené z hliníkového plechu o tloušťce 3 mm. Desky umístěné v horní a spodní části platformy jsou také vyrobené z hliníkového plechu o tloušťce 3 mm a jejich výztuže jsou vysoké 30 mm a tlusté 3 mm.



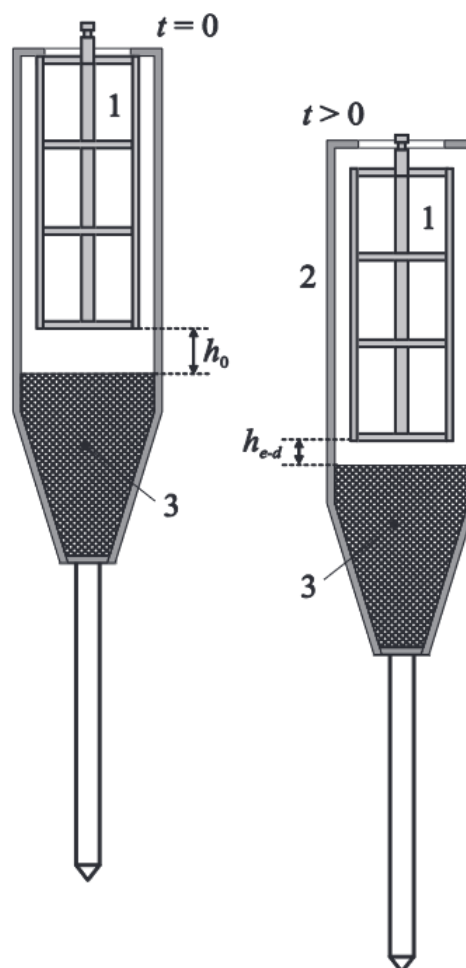
Obr. 30.: Rozměry experimentální platformy s popisem jednotlivých částí - 1. hliníkový profil, 2. police, 3. deska s výztuží, 4. vypouštěcí mechanismus

6.2. Aerodynamický štít

Jedná se o konstrukci, ve které je uložena experimentální platforma. Hlavní funkce aerodynamického štítu je snížení odporu vzduchu během pádu, aby na experimentální naklad působilo co nejméně vlivů z okolí. Detaily o konstrukci a rozměrech aerodynamického štítu jsem získal z diplomové práce pana Snížka [32].

Aerodynamický štít je složen ze dvou částí. Z válcové části o průměru 500 mm, a ze špičky, která má tvar komolého kužele. Špička je dlouhá 250 mm, průměr horní podstavy je 500 mm a průměr dolní podstavy je 240 mm.

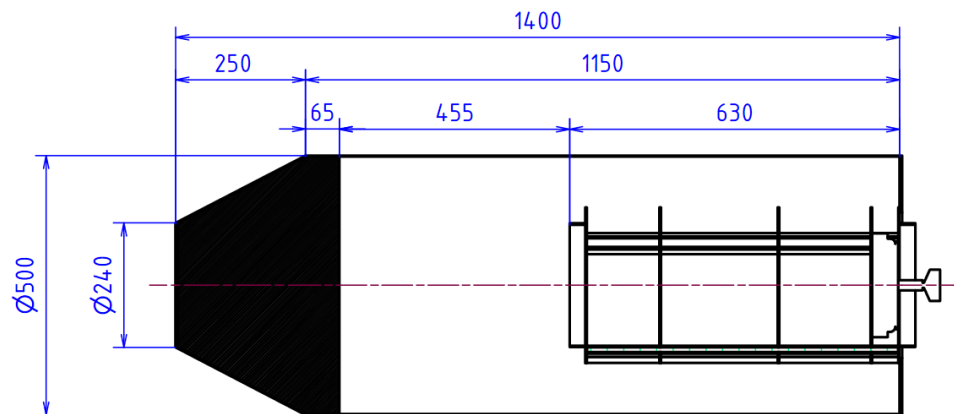
Během volného pádu kapsle zároveň padá uvnitř aerodynamického štítu experimentální platforma. Vzhledem k tomu, že na aerodynamický štít působí během pádu odpor vzduchu, tak experimentální platforma uvnitř štítu padá během volného pádu rychleji než samotný aerodynamický štít (Obr. 31). Z tohoto důvodu musí být mezi spodní částí experimentální platformy a spodní částí aerodynamického štítu minimální vůle o velikosti $h_0 = 455$ mm [32].



Obr. 31.: Náčrt pozice experimentální platformy vůči aerodynamickému štítu v pozici $t=0$ a $t>0$ – 1. experimentální platforma, 2. aerodynamický štít, 3. pěna pro zastavení experimentální plošiny – převzato z [20]

Pro zastavení experimentální plošiny na konci pádu jsou ve spodní části uvnitř aerodynamického štítu umístěné polystyrénové kuličky [32]. Polystyrénové kuličky zaplní veškerý prostor uvnitř kuželovité části aerodynamického štítu a také část prostoru ve válcové části, konkrétně 65 mm.

Vzhledem k tomu, že část experimentální platformy uvnitř válcové části aerodynamického štítu je vysoká 630 mm, a polystyrénové kuličky zaberou 50 mm z válcové části a prostor pro pád experimentální platformy musí být 455 mm, je celková délka válcové části 1150 mm. Tudíž celková délka aerodynamického štítu bez zapichovacího hrotu bude 1400 mm (Obr. 32).



Obr. 32.: Rozměry aerodynamického štítu



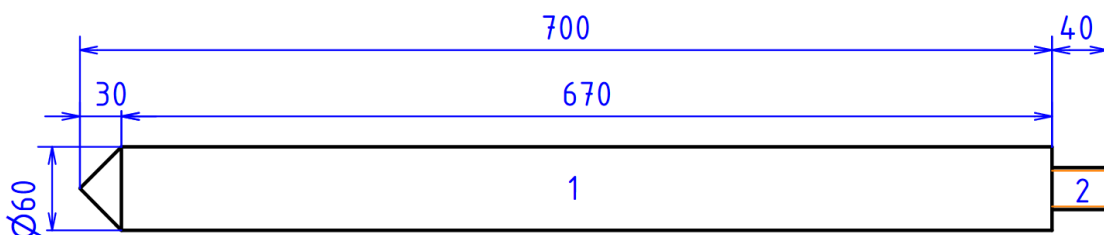
Obr. 33.: Řez 3D modelem pádové kapsle

6.3. Zapichovací hrot

Jedná se o část, která je připevněná ke spodní části aerodynamického štítu. Slouží ke zpomalení a zastavení pádové kapsle na konci pádu. Ve spodní části věže je umístěná nádoba s pískem, do které se zapichovací hrot zabodne, čímž dojde ke zpomalení a následně zastavení kapsle. Tento zádržný systém je aktuálně používán v pádové věži v IDR/UPM pro pádovou kapsli s nákladem o maximální hmotnosti 15 kg.

Pro určení přesných rozměrů zapichovacího hrotu a přesné hodnoty brzdného zrychlení by bylo vhodné provést experiment v pádové věži. Problém však je v tom, že v současné době pádová věž na ČVUT zatím není funkční a systémy potřebné pro fungování pádové věže jsou zatím pouze teoretické („na papíře“). Dále experiment není možné provést díky aktuální covidové situaci. V pádové věži v IDR/UPM je tento systém používán pro kapsli s nákladem o maximální hmotnosti 15 kg a dosahuje maximálního brzdného zrychlení 22 g. Vzhledem k tomu, že na ČVUT bude hmotnost pádové kapsle podobná hmotnosti kapsle ve věži IDR/UPM, lze tedy předpokládat že i hodnota brzdného zrychlení působícího na kapsli bude podobná. Lze tedy téměř s jistotou říct, že maximální hodnota brzdného zrychlení při použití tohoto zádržného systému nepřekročí požadovaný limit, který je 50 g. Z tohoto důvodu předpokládám, že rozměry zapichovacího hrotu mohou být podobné jako u pádové věže v IDR/UPM.

Vnější část zapichovacího hrotu je dlouhá 700 mm a její průměr je 60 mm. Špička hrotu je kuželovitého tvaru a je vysoká 30 mm, takže svírá úhel 90°. Vnitřní část hrotu (část, která bude uvnitř aerodynamického štítu) má délku 40 mm, průměr 30 mm a je se závitem, aby bylo možné zapichovací hrot přišroubovat ke spodní části aerodynamického štítu (Obr. 34).

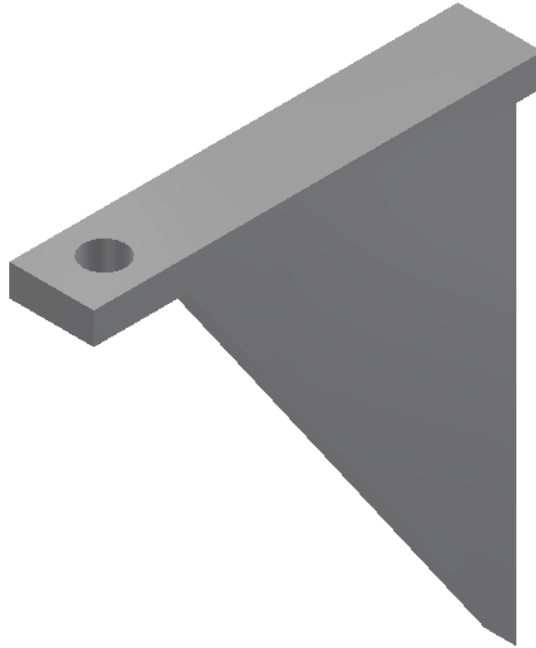


Obr. 34.: Schéma zapichovacího hrotu s rozměry - 1. vnější část hrotu, 2. vnitřní část hrotu

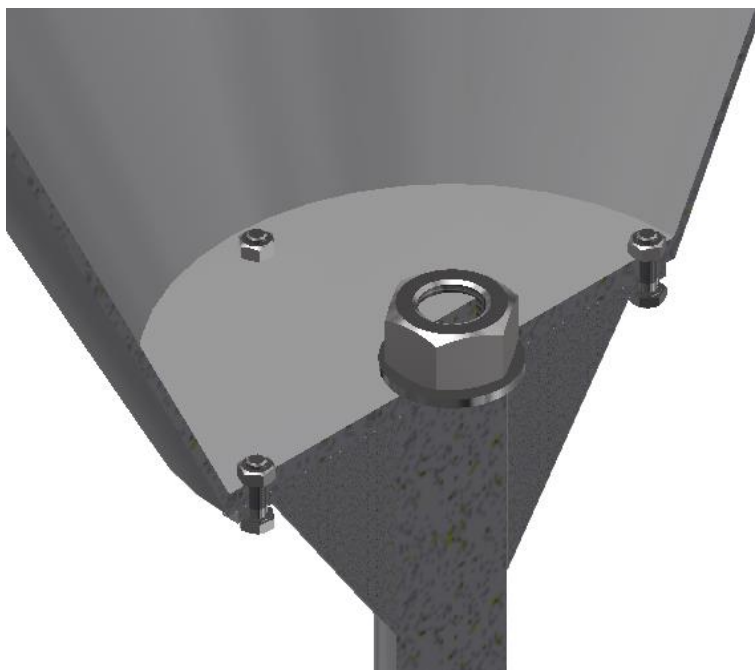
Spojení hrotu s aerodynamickým štítem bude provedeno pomocí vnitřní části hrotu se závitem a šestihrané matice s podložkou (Obr. 36). Hrot bude vyroben z ocelové tyče, stejně jako v pádové věži v IDR/UPM.

Aby se zajistilo, že během nárazu kapsle nedojde k deformaci aerodynamického štítu v místě spojení se zapichovacím hrotem důsledkem brzdného zrychlení, bude spodní část aerodynamického štítu vyztužena. Tloušťka plechu spodní části štítu, která má tvar komolého kužele bude 2 mm a tloušťka dolní podstavky kužele bude 4 mm. Dále bude pro zajištění vyšší pevnosti spoj vyztužen 4 výztuhami.

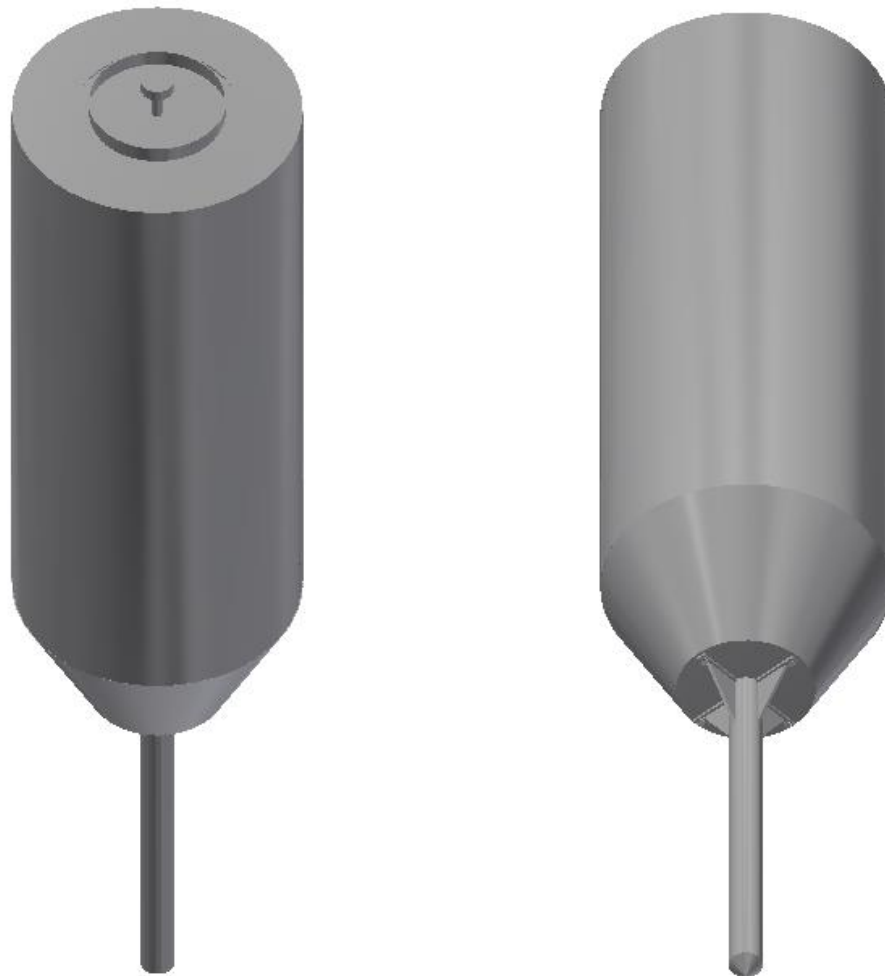
Každá výztuha (Obr. 35) je vytvořena ze dvou plechů, které jsou k sobě přivařené. První část je obdélníkového tvaru o rozměrech 16 mm x 85 mm a tloušťce 5 mm a druhá část je trojúhelníkového tvaru o délce 70 mm, výšce 150 mm a tloušťce 10 mm. Výztuhy budou k aerodynamickému štítu přišroubovány a k zapichovacímu hrotu přivařeny. Díky tomu může také výztuha podpořit zastavení kapsle při nárazu.



Obr. 35.: 3D model výztuhy



Obr. 36.: Zobrazení spojení hrotu a aerodynamického štítu s výztuhami na 3D modelu



Obr. 37.: 3D model pádové kapsle se zapichovacím hrotem

6.4. Pevnostní analýza spoje

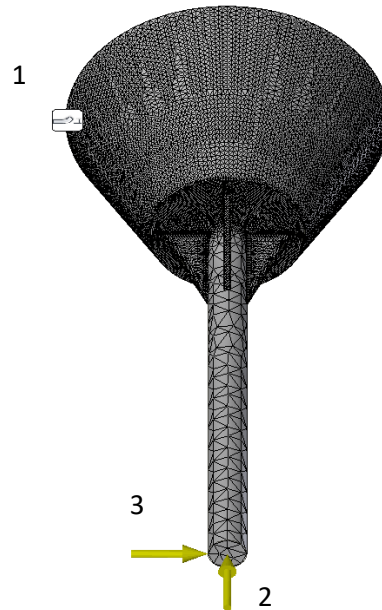
Pro zajištění pevnosti spoje mezi aerodynamickým štítem a zapichovacím hrotem je provedena pevnostní analýza. Spoj se nachází na dolní polovině kapsle, tudíž je provedena analýza pouze sestavy skládající se z komolého kužele, zapichovacího hrotu a výztuh. Analýza je provedena v programu Autodesk Inventor 2019 pomocí funkce Pevnostní analýza. Pro zjednodušení umístění sil a jejich směrů v analýze je odebrána špička ze zapichovacího hrotu. Odebrání špičky nemá na výsledek analýzy žádný vliv, ale velmi se tím zjednoduší její nastavení.



Obr. 38.: Model sestavy, na které bude provedena pevnostní analýza

Pevná vazba je v modelu umístěná na horní podstavě komolého kužele, jelikož pro pevnostní analýzu spoje není důležité, co se stane ve válcové části kapsle. Síla působící na kapsli během nárazu je umístěná v ose zapichovacího hrotu na jeho špičce a bude působit směrem do spoje (neboli nahoru). Jelikož není známá přesná hodnota brzdného zrychlení, je tato osová síla odpovídá velikosti brzdného zrychlení 50 g. Jelikož může během pádu kapsle dojít k jejímu vychýlení, je v modelu umístěná také síla odpovídající vychýlení. Tato síla je taktéž umístěná na konci zapichovacího hrotu, avšak působí směrem kolmo k ose zapichovacího hrotu. Velikost kolmé síly je ekvivalentní 5 % osově síly.

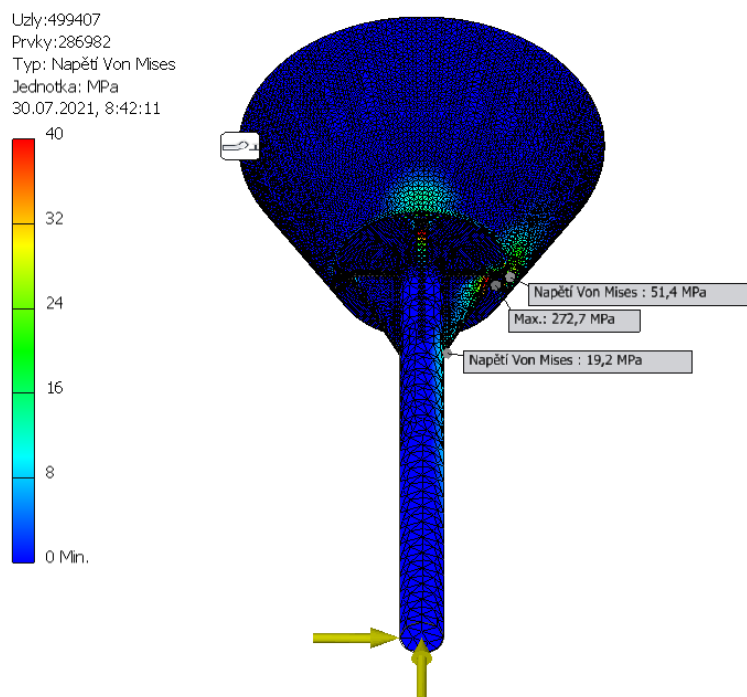
Na Obr. 39 je model již se sítí z trojúhelníkových elementů. Pro získání přesnějších výsledků je v okolí spoje velikost elementů menší, než ve zbytku modelu.



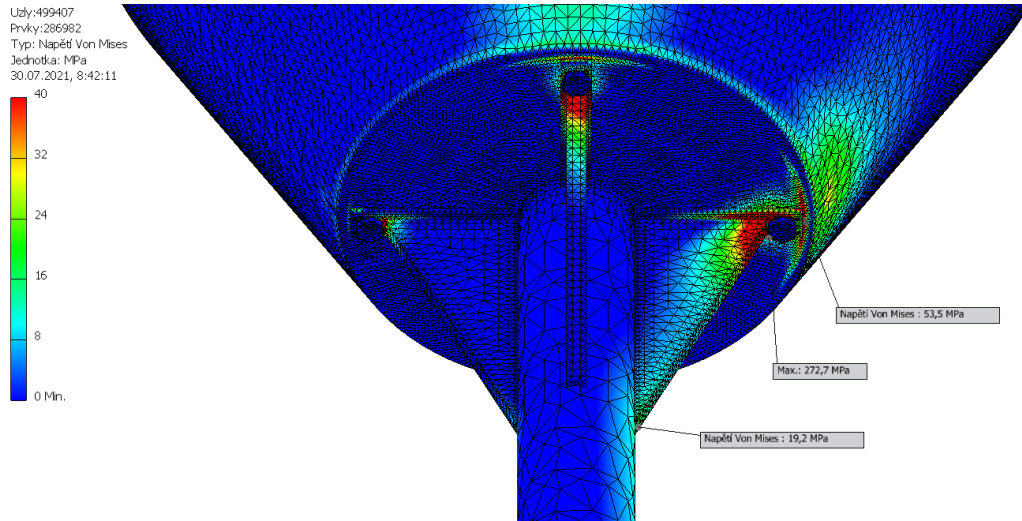
Obr. 39.: Zobrazení sítě modelu, včetně pevné vazby (1), osové síly (2) a kolmé síly (3)

6.4.1. Výsledky analýzy

Z výsledků analýzy (Obr. 40 a Obr. 41) lze vidět, že hodnoty napětí Von Mises řádově dosahují hodnot desítek MPa. Maximální hodnota napětí je na výtuzě a je rovna 272,7 MPa. Jedná se o stále přijatelnou hodnotu napětí, ale jelikož je tato hodnota několikanásobně vyšší než všechny ostatní hodnoty napětí, lze předpokládat, že se jedná o chybnou hodnotu.



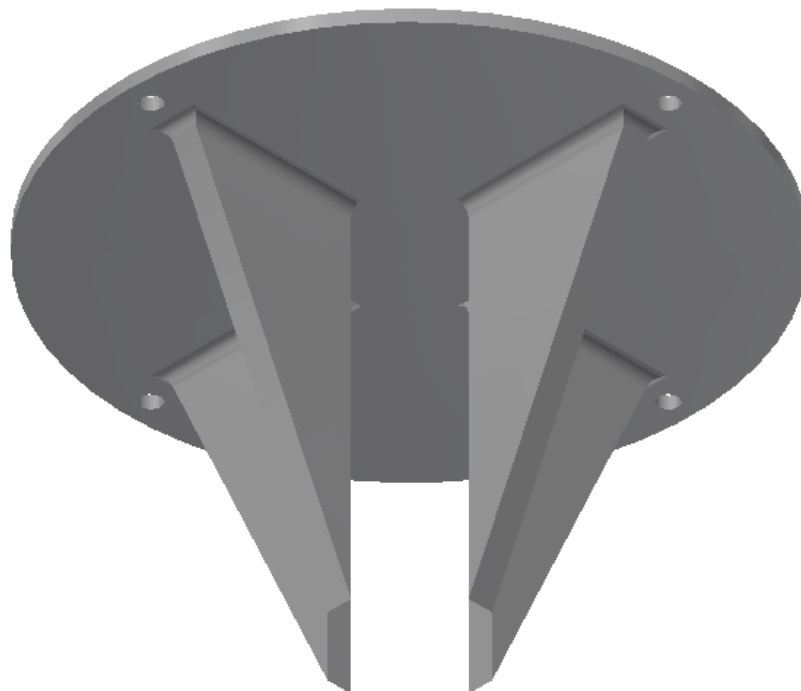
Obr. 40.: Výsledky analýzy – napětí Von Mises



Obr. 41.: Detailní pohled na analýzu spoje

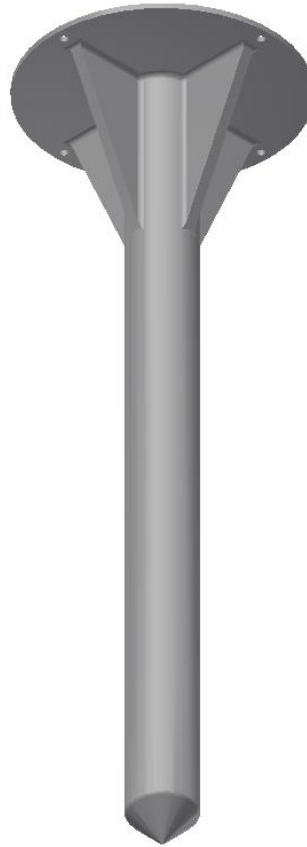
6.4.2. Úprava modelu

Z výsledků lze tedy předpokládat, že aktuální model splňuje pevnostní požadavky. Ale pro snížení hmotnosti a zjednodušení konstrukce jsem se rozhodl model trochu upravit. Zapichovací hrot je vyroben z ocelové trubky (místo ocelové tyče) o tloušťce 5 mm, na jejímž konci je přivařena špička hrotu. Všechny ostatní rozměry hrotu jsou totožné jako v předchozím návrhu (viz. str. 45). Spoj je vyztužen svařencem (50Obr. 42) (místo 4 samostatných výztuh), který je tvořen kruhovou deskou a 4 výztuhami. Rozměry výztuh jsou totožné jako v předchozím návrhu (viz. str.46) a kruhová deska je tlustá 5 mm a její průměr je 240 mm.

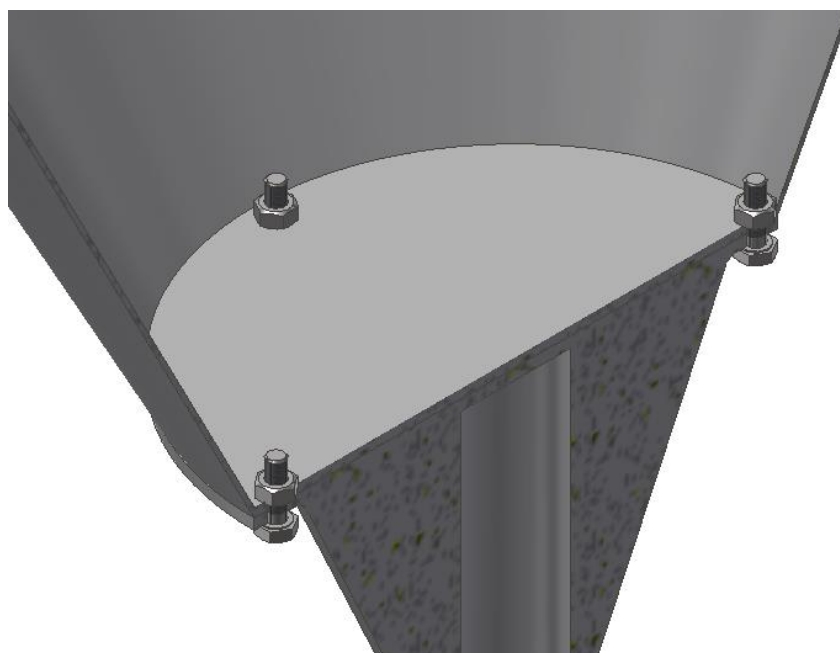


Obr. 42.: Model svařence

Zapichovací hrot je ke svařenci přivařen (Obr. 43). Vzhledem k tomu, že svařenec je přišroubován k aerodynamickému štítu, ztrácí smysl, aby byl zapichovací hrot také přišroubován k aerodynamickému štítu, jelikož je přivařen ke svařenci (Obr. 44).

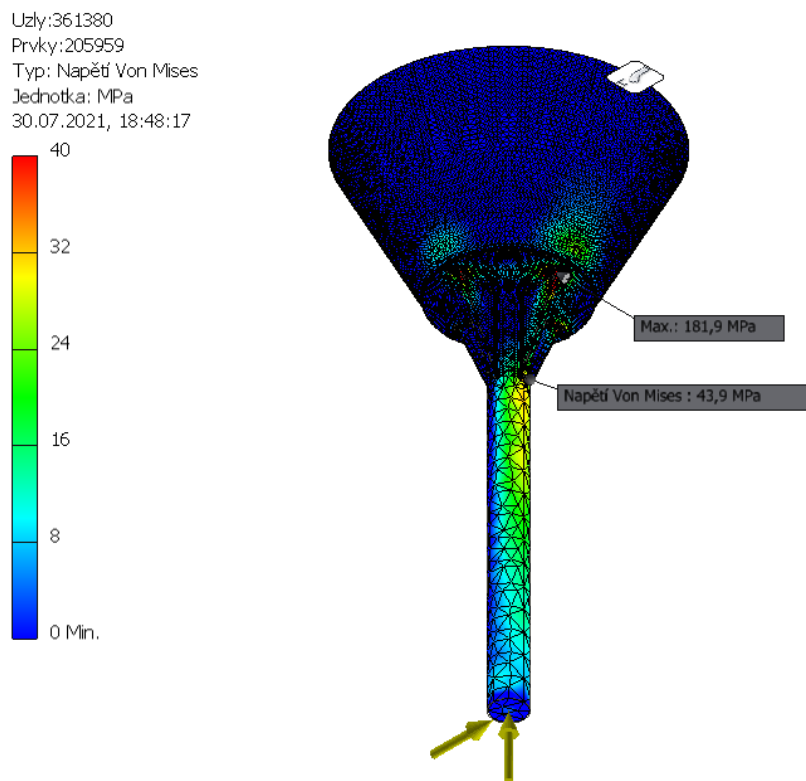


Obr. 43.: Model zapichovacího hrotu se svařencem



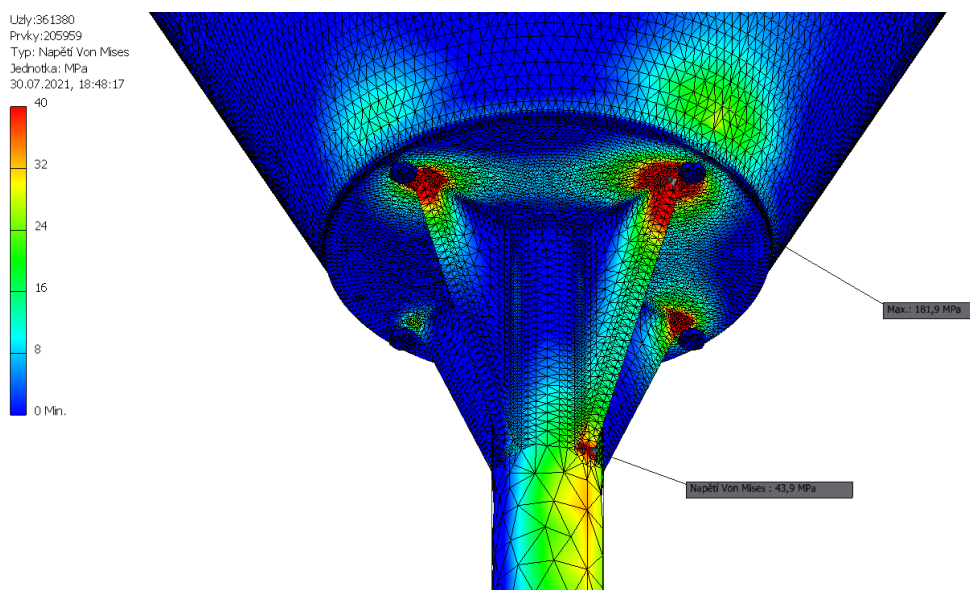
Obr. 44.: Průřez spojení aerodynamického štítu a zapichovacího hrotu

Výsledky pevnostní analýzy upraveného modelu je na Obr. 45. Vstupní parametry (pevná vazba, síly) a síť jsou totožné jako v předchozí analýze.



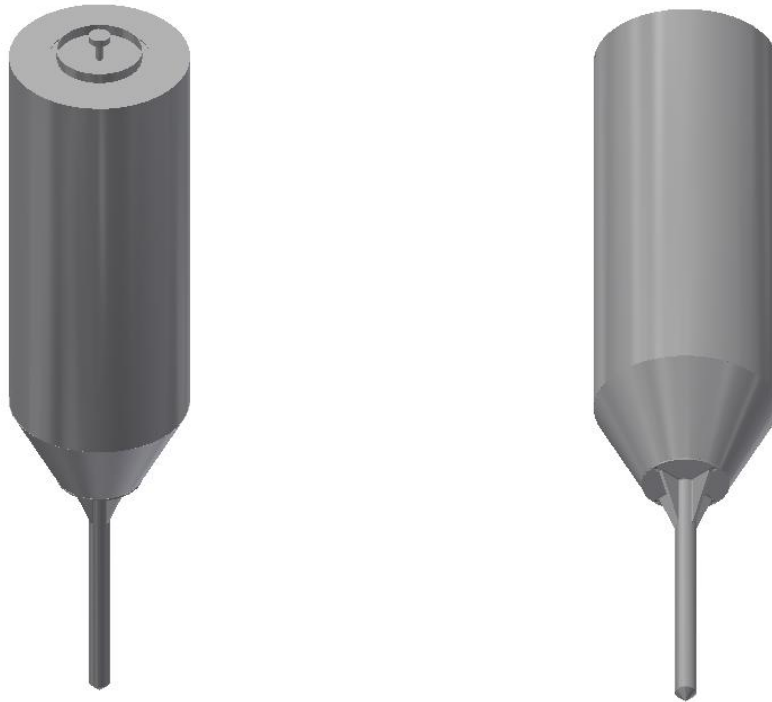
Obr. 45.: Pevnostní analýza upraveného modelu

Na Obr. 46 lze vidět detailní analýzu spojení mezi aerodynamickým štítem a zapichovacím hrotem. Hodnoty napětí Von Mises dosahují hodnot desítek MPa. Maximální hodnota napětí je rovna 181,9 MPa, ale jelikož je tato hodnota několikanásobně vyšší než všechny ostatní hodnoty napětí, lze opět předpokládat, že se jedná o chybnou hodnotu.

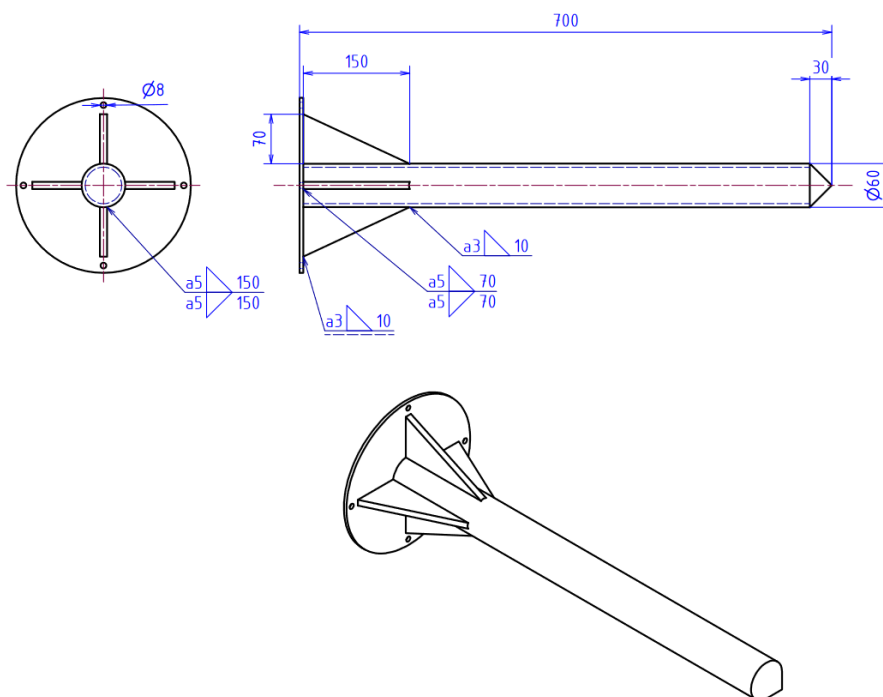


Obr. 46.: Detailní pohled na analýzu spoje

Pevnostní analýza upraveného modelu vychází lépe než u původního modelu a vzhledem k tomu, že celková hmotnost je nižší, je tedy výhodnější použít pro finální návrh brzdného systému upravený model. Finální návrh pádové kapsle se zapichovacím hrotem je znázorněn na Obr. 47 a základní náčrt zapichovacího hrotu je na Obr. 48



Obr. 47.: Finální 3D model pádové kapsle se zapichovacím hrotem



Obr. 48.: Náčrt zapichovacího hrotu s rozměry a sváry

6.5. Nádoba se suchým pískem

Součástí zádržného systému se zapichovacím hrotem je také nádoba se suchým pískem. Nádoba je umístěná ve spodní části pádové věže a na konci pádu se do ní zabodne kapsle se zapichovacím hrotem, čímž se zpomalí a zastaví. Jelikož délka zapichovacího hrotu je 700 mm, tak i výška nádoby s pískem musí být minimálně 700 mm, aby se při nárazu mohla celá délka hrotu zabodnout do písku, pokud by to bylo zapotřebí. Optimální výška nádoby je pro použitý zapichovací hrot 1200 mm (včetně rezervy), avšak v případě, že by se v budoucnu prováděli experimenty s těžším nákladem, tak by mohlo být potřeba použít delší hrot, či více hrotů. Proto by bylo dobré zvolit o něco větší nádobu. Průměr nádoby by měl být dostatečně velký, aby se zapichovací hrot zabodnul do písku i v případě mírného vychýlení. Zároveň je důležité, aby se nádoba vešla do spodní části věže, která má průměr 1,5 m, a zároveň aby byl okolo nádoby dostatečný prostor pro manipulaci. Nádoba by tedy byla vyrobená z kovové konstrukce válcového tvaru o výšce 1500 mm a průměru 500 mm.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provedení návrhu zádržného systému, který by se mohl použít k pádové věži na ČVUT, která zatím existuje pouze ve formě teoretických návrhů. Výběr vhodného zádržného systému byl proveden porovnáním aktuálně používaných zádržných systémů v pádových věžích.

Nejprve tedy byla provedena rešerše pádových věžích a jejich zádržných systémů. Následně bylo provedeno porovnání již existujících zádržných systémů s důrazem na požadavky pro použití na ČVUT. Je důležité, aby obsluha a konstrukce systému byla co nejjednodušší, aby byl systém vhodný pro pádovou kapsli o maximální hmotnosti 20 kg, aby brzdné zrychlení při zastavení kapsle nepřekročilo 50 g a také aby byl systém spolehlivý. Na základě těchto kritérií je tedy nejvhodnější zádržný systém se zapichovacím hrotem. Tento systém je používán v pádové věži v IDR/UPM a maximální hodnota brzdného zrychlení zde dosahuje 22 g [20].

Vzhledem k tomu že zapichovací hrot je součástí pádové kapsle, bylo zapotřebí znát její rozměry. Ty jsem čerpal z diplomové práce pana Snížka [Snížek]. Návrh konstrukce byl proveden ve formě 3D modelu v CAD programu. Dále byla provedena pevnostní analýza, aby byla zajištěna dostatečná pevnost aerodynamického štítu během nárazu. Především bylo důležité zajistit pevnost spoje mezi zapichovacím hrotem a aerodynamickým štítem. Jelikož skutečná hodnota brzdného zrychlení je neznámá, počítám s maximální povolenou hodnotou, což je 50 g. Na základě pevnostní analýzy byl konstrukční návrh upraven, aby byla celková hmotnost konstrukce nižší a aby byla jednodušší výroba.

Jelikož nebylo možné provést experiment především z důvodu aktuální covidové situace, ale také kvůli tomu, že pádová věž na ČVUT zatím existuje pouze ve formě teoretického návrhu, bylo by vhodné v budoucnu provést experiment s tímto systémem. Díky tomu by se zjistila přesná hodnota brzdného přetížení působícího během nárazu na kapsli, na základě kterého by se mohlo upravit vyztužení spoje mezi aerodynamickým štítem a zapichovacím hrotem.

Reference

- [1] Capsule deceleration chamber / container (filled with polystyrene pellets). In: *ZARM: Drop tower environment* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.zarm.uni-bremen.de/en/drop-tower-deprecated/experiment-support/experiment-operation/drop-tower-environment.html>
- [2] V.V., Nikhil, Abhilash NAIR, Niketh P, Amit KUMAR a Muruganandam T.M. The 2.5 s Microgravity Drop Tower at National Centre for Combustion Research and Development (NCCRD), Indian Institute of Technology Madras. *Microgravity Science and Technology* [online]. 2018, **30**(5), 663-673 [cit. 2021-07-28]. ISSN 0938-0108. Dostupné z: doi:10.1007/s12217-018-9639-0
- [3] NASA - *Space Station Research & Technology* [online]. 2021 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/index.html
- [4] Space Station Assembly. In: *International Space Station* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/space-station-assembly
- [5] M. MARCONI, Elaine. *NASA - What is a Sounding Rocket?* [online]. 2004 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/missions/research/f_sounding.html
- [6] *NASA Sounding Rocket Program Overview* [online]. [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://rscience.gsfc.nasa.gov/srrov.html>
- [7] ADKINS, Jamie, ed. A parachute test for a future mission to Mars successfully launched on a NASA Black Brant IX suborbital sounding rocket. In: *ASPIRE Parachute Test a Success* [online]. 2018 [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/wff-2018-076-002.jpg>
- [8] ZELL, Holly, ed. Types of Balloons. *Scientific Balloons* [online]. 2019 [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>
- [9] GARNER, Rob, ed. Scientific Balloons Overview. *Scientific Balloons* [online]. 2019 [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/scientificballoons/overview>
- [10] ZELL, Holly, ed. Taking LDS Vehicle to Test Altitude. In: *Scientific Balloons* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/taking-lsd-vehicle-to-test-altitude>
- [11] HALOUSEK, Milan. LETADLEM DO BEZTÍŽNÉHO STAVU. In: *KOSMOS - NEWS č. 78* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20070606225833/http://kosmos-news.kosmo.cz/kosmos78.htm>
- [12] Nepřipoutejte se, prosím. *Vesmír v České republice* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Nepripoutejte_se_prosim

- [13] Experimenty v mikrogravitaci při parabolických letech Zero-G. In: *Projektová výzva CORA* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: https://www.czechspace.cz/sites/default/files/styles/large/public/zerog_cnes.jpeg?itok=rT-Bjdi2
- [14] STEINBERG, Ted. Reduced Gravity Testing and Research Capabilities at Queensland University of Technology's New 2.0 Second Drop Tower. *Advanced Materials Research* [online]. 2008, **32**, 21-24 [cit. 2021-07-28]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.32.21
- [15] VON KAMPEN, Peter, Ulrich KACZMARCZIK a Hans J. RATH. The new Drop Tower catapult system. *Acta Astronautica* [online]. 2006, **59**(1-5), 278-283 [cit. 2021-07-28]. ISSN 00945765. Dostupné z: doi:10.1016/j.actaastro.2006.02.041
- [16] HALL, Nancy, Dennis STOCKER a Richard DELOMBARD. Student Drop Tower Competitions: Dropping In a Microgravity Environment (DIME) and What If No Gravity? (WING). *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011, , - [cit. 2021-07-28]. ISBN 978-1-60086-950-1. Dostupné z: doi:10.2514/6.2011-496
- [17] WEISLOGEL, M. M. a C. L. NARDIN. Capillary driven flow along interior corners formed by planar walls of varying wettability. *Microgravity - Science and Technology*. 2005, **17**(3), 45-55. ISSN 0938-0108. Dostupné z: doi:10.1007/BF02872087
- [18] OSBORNE, Barnaby a Chris WELCH. Short Duration Reduced Gravity Drop Tower Design and Development. *Journal of the British Interplanetary Society*. 2012, **65**(2), 71-76.
- [19] ZHANG, Xiaoqian. Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC). *Science in China Series E* [online]. 2005, **48**(3) [cit. 2021-07-28]. ISSN 1006-9321. Dostupné z: doi:10.1360/102004-21
- [20] MESEGUER, J, A SANZ-ANDRÉS, I PÉREZ-GRANDE, S PINDADO, S FRANCHINI a G ALONSO. Surface tension and microgravity. *European Journal of Physics* [online]. 2014, **35**(5) [cit. 2021-07-28]. ISSN 0143-0807. Dostupné z: doi:10.1088/0143-0807/35/5/055010
- [21] Introduction. *The Bremen Drop Tower* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.zarm.uni-bremen.de/en/drop-tower-deprecated/experiment-support/experiment-operation/introduction.html>
- [22] Chapter 4 - Drop Tower. SABBATINI, Massimo, Nicole SENTSE, Giuseppe DE CHIARA a David DUCROS. *ESA User Guide to Low Gravity Platform* [online]. ESA, 2014 [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/EUG2LGPr3/EUG2LGPr3-4-DropTower.pdf>
- [23] BLIUMENTALIS, Doris, ed. 2.2 Second Drop Tower. *Glenn Research Center* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www1.grc.nasa.gov/facilities/drop/>
- [24] BLIUMENTALIS, Doris, ed. Zero Gravity Research Facility. *Glenn Research Center* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www1.grc.nasa.gov/facilities/zero-g/>

- [25] HEIDMAN, Kelly, ed. NASA Glenn's Zero Gravity Research Facility. In: *Glenn Research Center* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/image-feature/nasa-glenn-s-zero-gravity-research-facility>
- [26] View of the decelerator at the bottom of the Zero Gravity Research Facility. In: *Zero Gravity Research Facility* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: https://www1.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/1966_03684_M.jpg
- [27] DIANA, Antoine, Martin CASTILLO, David BRUTIN a Ted STEINBERG. Sessile Drop Wettability in Normal and Reduced Gravity. *Microgravity Science and Technology* [online]. 2012, **24**(3), 195-202 [cit. 2021-07-28]. ISSN 0938-0108. Dostupné z: doi:10.1007/s12217-011-9295-0
- [28] SNYDER, T., J. SITTER a J. N. CHUNG. Design and Testing of an Airbag System for High-Mass, High-Velocity Deceleration. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* [online]. Vol. 119. 1997, , s. 631-637 [cit. 2021-07-28]. ISSN 0022-0434. Dostupné z: doi:10.1115/1.2802371
- [29] LIU, T. Y., Q. P. WU, B. Q. SUN a F. T. HAN. Microgravity Level Measurement of the Beijing Drop Tower Using a Sensitive Accelerometer. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6**(1) [cit. 2021-07-28]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep31632
- [30] FIGUEROA, A, F SORRIBES-PALMER, M FERNANDEZ DE PIEROLA a J DURAN. Drag-shield drop tower residual acceleration optimisation. *European Journal of Physics* [online]. 2016, **37**(4) [cit. 2021-07-28]. ISSN 0143-0807. Dostupné z: doi:10.1088/0143-0807/37/4/045805
- [31] National Microgravity Laboratory (Beijing, China). In: *Seven Easy Ways Scientists Get Rid Of Gravity For Experimentation* [online]. 2016 [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.gizmodo.com.au/2016/05/seven-easy-ways-scientists-get-rid-of-gravity-for-experimentation/>
- [32] SNÍŽEK, Jan. *Pádový kontejner pro experimenty v podmínkách mili/mikrogravitace*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze.



Přílohy

1. 3D model kapsle se zapichovacím hrotem
2. 3D model spoje s pevnostní analýzou (pro aplikaci Autodesk Inventor)