

Skrivni junaki nebotičnikov

Umetnost umirjanja velikanov



Si lahko predstavljate, da stojite v pisarni v 50. nadstropju bleščečega nebotičnika v osrčju velemesta? Pod vami se razprostira mravljišče avtomobilov, skozi okno pa vidite, kako se sosednje stavbe zibljejo v ritmu močnega vetra. Čutite rahlo, komaj zaznavno zibanje. Morda se vam zdi celo malce zabavno, kot na ladji. A kaj, ko se veter okrepi v nevihto? Ali pa, ko tla pod vami zatrese potres?

Stolpnice so zasnovane tako, da so prožne. Inženirji vedo, da se toga zgradba pod silo vetra ali potresa zlomi, medtem ko se prožna upogne in zaniha. Nihanje samo po sebi torej ni znak šibkosti, ampak pametne zasnove! Je način, kako zgradba preživi ekstremne sile narave. Vendar pa obstaja meja. Meja med varnim nihanjem in kaosom. In še pomembneje: meja med tem, kar je varno za stavbo, in tem, kar je udobno in sprejemljivo za ljudi v njej. Kdo si želi delati v pisarni, kjer se mu nenehno vrti, ali živeti v stanovanju, kjer ob vsaki nevihti z miz padajo kozarci?

A inženirji imajo v rokavu močnega asa: dušeno nihalo ali angleško TMD (Tuned Mass Damper). In zgodba enega najbolj dramatičnih trenutkov v zgodovini sodobne arhitekture se je srečno zaključila prav zaradi njega.

Drama v srcu Manhattna: Citicorp Center

Leta 1977 je v New Yorku zrasla nova gradbena ikona: Citicorp Center (danes Citigroup Center). S svojo značilno poševno streho in edinstveno zasnovo, kjer celotna stavba sloni na zgolj štirih masivnih stebrih, je takoj pritegnila pozornost. Da bi naredili prostor za cerkev, ki je stala na robu zemljišča in se ni hotela umakniti, arhitekti niso postavili stebrov stolpnice na vogale, kot je to v navadi, temveč so stebre postavili na sredino vsake stranice. A sprva genialna rešitev je v sebi skrivala veliko nevarnost!

Leto po odprtju stolpnice je študentka gradbeništva Diane Hartley za svojo seminarsko nalogo analizirala prav to stavbo. Odkrila je nekaj, kar so spregledali tudi vrhunski inženirji: zasnova je bila preizkušena za vetrove, ki pihajo pravokotno na stranice stavbe, ni pa upoštevala strižnih vetrov – predvsem tistih, ki pihajo pod kotom 45 stopinj, naravnost v vogale. Izračuni so bili šokantni. Veter, ki New York zadane enkrat na vsakih 16 let, bi lahko povzročil takšno obremenitev na slabo vijačenih spojih konstrukcije, da bi stavba preprosto popustila in se zrušila.

Mesto je bilo v nevarnosti, a se tega sploh ni zavedalo. Glavni inženir William LeMessurier je, ko so ga seznanili z odkritjem, preveril izračune in z grozo ugotovil, da držijo. A imel je svojega asa. Na vrh stolpnice so že med gradnjo vgradili takrat revolucionarno napravo – 410-tonski betonski blok, ki je drsel na tanki plasti olja in bil povezan z velikanskimi hidravličnimi blažilci. Deloval je kot dušeno matematično nihalo (TMD). Njegov prvotni namen je bil zmanjšati neprijetno zibanje v vetru, da bi bilo bivanje v stavbi udobnejše. Zdaj pa je postal ključni del reševalne misije.

V popolni tajnosti, medtem ko je proti obali drvel orkan Ella, so inženirji ponoči na stavbi varili ojačitvene plošče na več kot 200 vijačenih spojih in hkrati zagotovili, da je blažilec ves čas deloval. TMD sam po sebi ne bi preprečil porušitve, a je drastično zmanjšal nihanje stavbe in s tem obremenitve, kar je inženirjem kupilo dragoceni čas. New York je imel srečo, orkan je zavil na morje, popravila so bila končana in katastrofa je bila preprečena. Zgodba je prišla v javnost šele desetletja kasneje in postala legendaren primer inženirske etike in genialnosti tehnologije TMD.

Dušeno matematično nihalo

Princip delovanja TMD je presenetljivo preprost in eleganten. Predstavljajte si otroka na gugalnici. Vsaka gugalnica ima svojo naravno frekvenco – ritem, v katerem najlažje niha. Če nekdo otroka potiska v točno tem ritmu, bo z vsakim potiskom zanihal višje. Temu pojavu pravimo resonanca. Enako se zgodi z zgradbo. Vsaka ima svojo naravno frekvenco nihanja. Ko potresni sunki ali sunki vetra zadenejo stavbo v ritmu, ki je blizu njeni naravni frekvenci, se njeno nihanje okrepi.

Uglašeni dušilec je v bistvu "proti-nihalo". To je velika masa (kot betonski blok v Citicorp Centru ali ogromna jeklena krogla), ki je uglašena tako, da niha na isti naravni frekvenci kot sama zgradba. Ko se zgradba začne zibati v eno smer, se TMD zaradi svoje vztrajnosti upre gibanju in zaniha v nasprotno smer. S tem "potegne" stavbo nazaj in absorbira energijo nihanja. To energijo nato preko blažilcev (podobnih tistim v avtomobilih) pretvori v toploto in jo varno razprši. Rezultat? Stavba se umiri, njeno nihanje pa je bistveno manjše.

Tehnologija TMD danes ni več redkost, ampak ključni element v mnogih najvišjih in najdržnejših konstrukcijah po svetu:

- **Taipei 101 (Tajvan):** Morda najbolj znan primer. V 87. do 92. nadstropju visi gigantska, 660-tonska »zlata« krogla, ki je prava turistična atrakcija. Njihov TMD ščiti nebotačnik pred močnimi tajfuni in potresi, ki so na Tajvanu pogosti.
- **Most Millennium (London):** Ko so ta most za pešce odprli, so ga morali zaradi nepričakovanega in močnega bočnega nihanja (ki so ga povzročili kar pešci s svojo usklajeno hojo!) zapreti. Rešitev? Vgradnja vrste manjših dušilcev mase pod pohodno površino.



- **Burj Khalifa (Dubaj):** Tudi najvišja stavba na svetu uporablja več manjših TMD-jev, da zagotavlja stabilnost in udobje.

TMD niso vedno le ogromne krogle ali betonski bloki. Inženirji so razvili tudi tekočinske dušilce (angleško Sloshing Dampers). To so veliki rezervoarji z vodo ali drugo tekočino. Ko se stavba nagne, tekočina pljuske na nasprotno stran rezervoarja in s svojo maso umiri gibanje. So cenejši in enostavnejši za vzdrževanje, a prav tako učinkoviti.

Rešite svojo stolpnico!

Zdaj, ko poznate skrivnost umirjanja velikanov, je čas, da svoje znanje preizkusite v praksi. V tej tekmovalni nalogi boste postali ekipa gradbenih inženirjev in arhitektov. Vaša naloga bo zasnovati in zgraditi model lastne stolpnice iz preprostih materialov, razumeti in izmeriti naravno frekvenco vaše zgradbe, načrtovati, izdelati in uglasiti svoj lasten dušilec mase (TMD), ki bo vašo stavbo zaščitil ter preizkusiti svojo stvaritev na potresni mizi, ki bo simulirala močan potresni sunek.

Cilj ni le, da vaša stolpnica preživi. Cilj je, da se ob potresu čim manj ziblje, da ostane stabilna in varna za svoje namišljene prebivalce. Boste uporabili klasično nihalo? Morda maso na vzmeteh? Ali pa boste morda razvili svojo, inovativno rešitev, kot je tekočinski dušilec?

Potres prihaja. Bo vaša stolpnica pripravljena?

Potrebni pripomočki

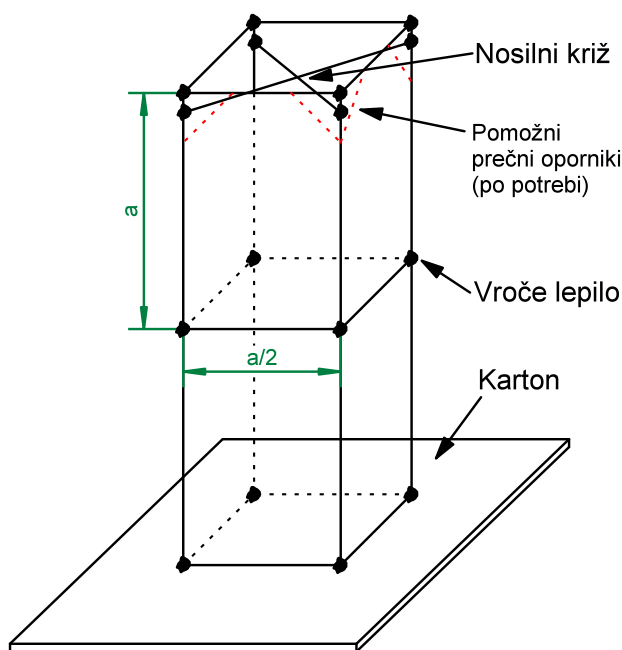
Za izvedbo naloge potrebujemo:

- Lesene palčke za ražnjiče
- Lepilo za vroče lepljenje
- Dve večji elastiki za embalažo (dobimo jih v boljše založenih trgovinah)
- Trdno kartonasto podlago
- Dva kosa plastičnih odtočnih cevi ali trdih cevi za električno napeljavo
- Različno težke knjige
- M3/M4 vijake ali matice za utež
- Manjšo kartonasto škatlico ali plastično posodico (embalaža vatiranih palčk, žvečiln ...)
- Kuhinjsko tehtnico
- Mobilni telefon s kamero za ustvarjanje video posnetkov

Opis poteka naloge

Najprej moramo zgraditi visoko stolpnico. Kot material za gradnjo bomo uporabili dolge lesene palčke za ražnjiče. Posamezne stebre stolpnice združimo z lepilom za vroče lepljenje. Vrh stolpnice bomo obtežili s knjigo in s tem simulirali vsa nadstropja, težo obiskovalcev in betona. Nosilni stebri morajo zdržati obremenitev knjige, zato uporabimo dve palčki vzporedno, kar nam bo povečalo nosilnost naše stolpnice.

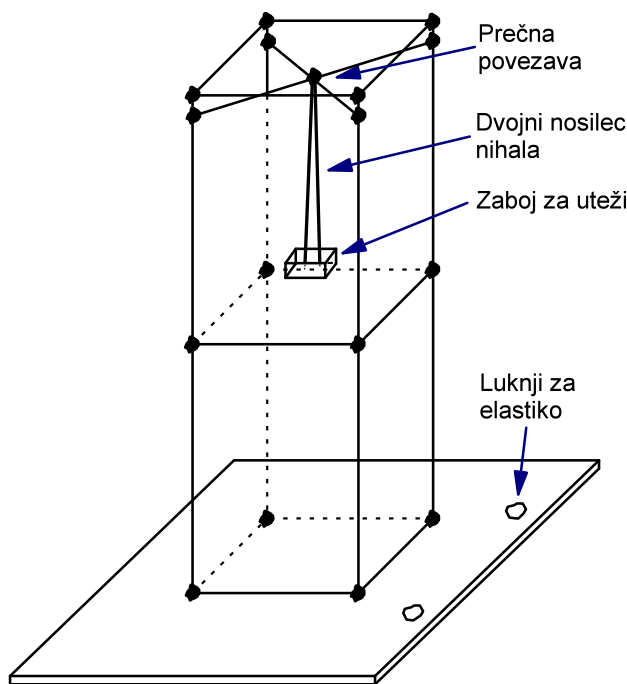
Stolpnica naj ima vsaj dve nadstropji in v višino meri vsaj 45 cm. Pritličje, prvo nadstropje in streho povežemo po stranicah tako, da na polovico prelomimo steber nadstropja in skupaj povežemo vse stebre kot to prikazuje Slika 1.



Slika 1: Gradnja preproste stolpnice.

oporniki naj bodo čim krajši, dolgi zgolj nekaj centimetrov, nahajajo pa naj se tik ob spoju treh stebrov posameznih kotov.

Če stolpnica vidno visi postrani, jo tudi s prečnimi oporniki ne bomo mogli dovolj utrditi. Pod težo knjige se bo vedno rušila. V tem primeru bo bolje, da se gradnje lotimo od začetka.



Slika 2: Izgradnja nihala.

Stolpnico pri tleh pritrdimo na trdo kartonasto ploščo, ki bo služila kot naš temelj. Z lepilom prilepimo zgolj štiri kote. Preizkusimo ali naša stolpnica lahko nosi težo knjige, ki je velika ravno toliko, da v celoti prekrije vrh stolpnice, ter ima trdne platnice.

V kolikor okostje naše stolpnice ni dovolj trdno, da bi brez težav nosilo težo knjige in se želi sesesti samo vase, dodamo pomožne prečne opornike. Te najprej namestimo tik pod vrh stolpnice, samo v eni smeri, zgolj po potrebi še v drugi smeri.

Če to še vedno ni dovolj, namestimo prečne opornike tudi pri tleh. Kot zadnjo izmed možnosti namestimo prečne opornike okoli spojnega člena nadstropji na sredini stolpnice. Vsi

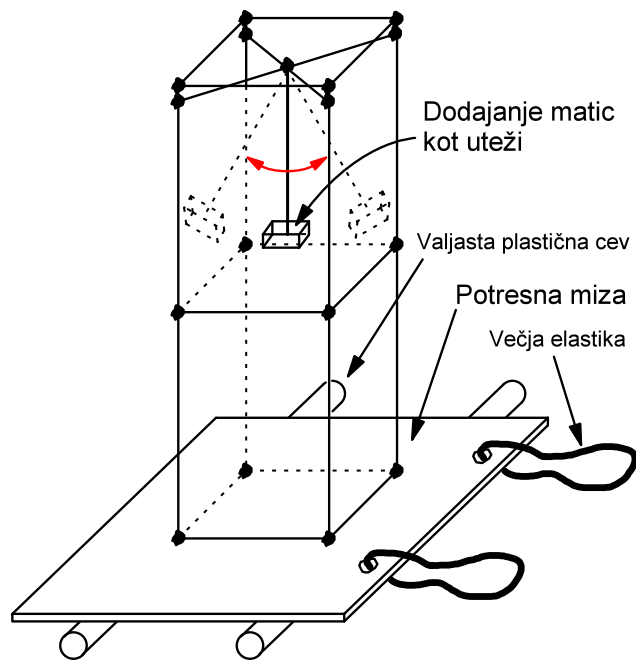
Namestimo najmanjše možno število prečnih opornikov. Zgolj toliko, da bo stolpnica vzdržala nihanje skupaj s knjigo na vrhu. Preveč prečnih opornikov bo sicer naredilo res stabilno zgradbo, vendar poskus ne bo deloval tako, kot bi si to želeli.

Ko stolpnica vzdrži težo knjige, se lotimo gradnje nihala, ki bo blažilo nihanje zgradbe. 2-3 cm pod vrhom stolpnice izdelamo križno povezavo iz dveh samostojnih palčk. Na njiju bomo obesili nihalo, odmik od vrha pa bo omogočal nihanje tudi s položeno knjigo. Nihalo izdelamo iz dveh palčk in majhne škatlice, ki jo sestavimo iz kartona, ali pa uporabimo škatlico, ki jo imamo pri roki. Obe nosilni palčki prebodeta škatlo na

dnu, kamor ju pritrdimo z vročim lepilom. Središče mase škatlice mora biti na njeni sredini, drugače nihalo ne bo učinkovito.

V rob kartona z izvijačem ali škarjami izdobljamo dve luknji za elastiko. Uporabimo daljšo elastiko za embalažo, ki jo dobimo v vseh boljše založenih trgovinah. Elastiko na enem koncu zavežemo, na drugem pa jo pustimo prosto, kot to prikazuje Slika 3.

Povsem na koncu, ko smo pripravljeni na naše poskuse, zgradimo še potresno mizo. Za lažje delo bomo dovolili nihanje zgolj v eni smeri. Pod kartonasto podlogo namestimo dve plastični cevi, ki naj podpirata podlogo po celotni dolžini. Uporabimo lahko plastično odtočno cev, ali trdo plastično cev za električno napeljavo. Končen izgled poskusa prikazuje Slika 3.



Slika 3: Potresna miza.

Obe elastiki pritrdimo na nosilni steber ograde, noge kovinske mize, stola, ali pa sami izdelamo trdno pokončno vpenjalo. Da sprožimo potres, bomo kartonasto podlogo odmaknili od vpete točke (elastike se bodo napele) in jo spustili, da se zaleti v steber. S tem bomo simulirali potres s premikom zemlje vzdolž smeri potovanja potresnega vala. Če so elastike predolge, lahko med steber in podlogo postavimo oviro (na primer kartonasto škatlico ali plastično posodo), ki bo elastike rahlo napela že v začetni legi.

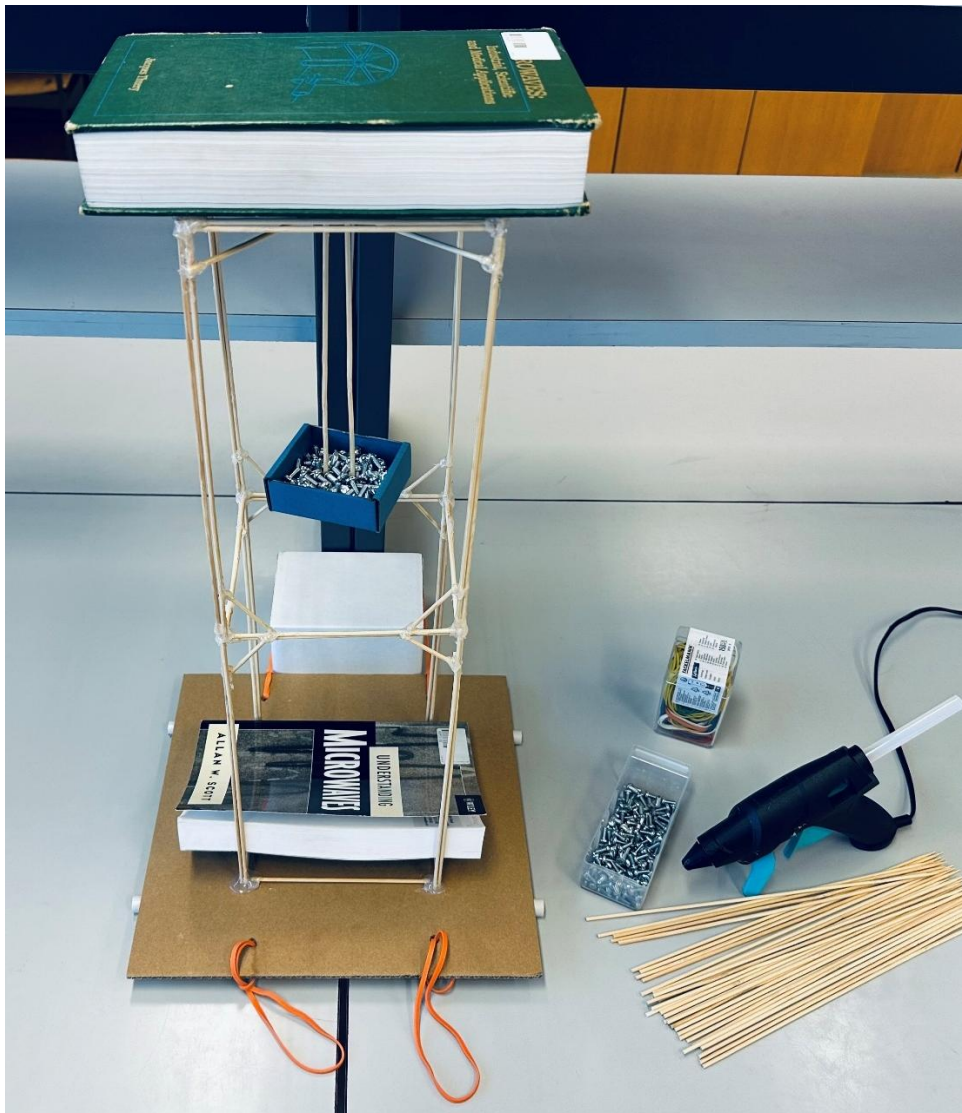
Teža knjige na vrhu zgradbe bo povzročila, da se podlaga na valjih želi prevrniti. Spodnji del stolpnice obtežimo s knjigo iz mehkih platnic. Knjiga ne sme preveč pritiskati na nosilne stebre, da jih ne ukrivi!



Slika 4: Potresna miza, napete elastike in obtežitev s knjigo.

Sedaj je čas, da se lotimo poskusov. Meritve pričnemo brez nihala, ki naj bo popolnoma odstranjeno, ne zgolj prazno (brez uteži). Potresno mizo odmaknemo iz začetne lege in jo hitro spustimo. Opazujemo nihanje stavbe, ko se podlaga zabije ob vpenjalno konstrukcijo. Kako daleč moramo odmakniti potresno mizo, ugotovimo s poskušanjem. Doseči želimo čim večje nihanje stavbe, brez da bi ogrozili njeno stabilnost.

Zabeležimo si optimalni odmik potresne mize iz začetne lege. Pripravimo mobilni telefon za video snemanje in ga pritrdimo na podstavek, ali pa ga naslonimo na oporo, da bo kamera zajela celotno zgradbo. Snemanje nastavimo za čim večje število sličic na sekundo, oziroma izberemo snemanje v počasnem načinu (angleško Slow Motion). Potres stavbe sprožimo vsaj trikrat in posnamemo zibanje zgradbe.



Slika 5: Postavitev poskusa in potrebni pripomočki.

Zdaj stavbo še rešimo pred potresom! Namestimo predhodno izdelano nihalo s škatlico. Vanjo natresemo nekaj manjših vijakov velikosti M3, M4, matic, ali drugih uteži, ki so nam pri roki. Potresno mizo zopet izmaknemo v prej določeno lego in spustimo. Opazujemo nihanje zgradbe in nihala. S povečevanjem ali zmanjševanjem uteži določimo potrebno maso, ki da najboljši rezultat. Takrat se bo nihanje stolpnice izjemno hitro umirilo. Za vsak poskus si zabeležimo število uporabljenih vijakov in posnamemo odziv s kamero telefona.

Za konec s kuhinjsko tehtnico stehtamo vse uteži, ki smo jih uporabili v nihalu ter težo knjige, ki smo jo položili na vrh naše zgradbe. Preučimo video posnetke in opazujemo smer nihanja zgradbe in nihala.

Ko izmaknemo potresno mizo iz začetne lege, najprej počakamo, da se nihalo povsem umiri, šele nato lahko pričnemo s poskusom! V nasprotnem primeru ne bomo dobili ponovljivih rezultatov!

Lepilo za vroče lepljenje postane zelo tekoče in res zelo vroče. Povzroči hude opekline, zato z njim ravnajmo kar se da previdno. Če na kožo dobimo kapljo lepila, jo, dokler je še vroča, čim hitreje obrišemo iz kože, opekline pa spiramo pod hladno vodo. Kasneje na opečen del kože naneseemo hladilni gel.

Nasveti

- Knjiga na vrhu stolpnice mora biti dovolj težka, drugače stavba ne bo zanihala. Optimalno težo moramo ugotoviti s poskušanjem. Stavbo želimo spraviti v resonanco, da vidimo vsaj 5 prenihajev.
- Lepilo za vroče lepljenje je odličen absorber in dobro duši premikanje. Poskus deluje veliko bolje, če palčke lepimo s togim lepilom za les ali epoksi smolo. Seveda je čas sestavljanja temu primerno daljši.
- Da nihalo blaži nihanje mora svojo energijo delno prenašati na zgradbo. Točka vpetja naj del te energije prenese na nosilno konstrukcijo. Za to kar dobro poskrbi lepilo za vroče lepljenje, ki ga uporabimo za združevanje obeh palčk nihala. Zaradi svoje prožne površine se obnaša kot dober dušilec. Uporabimo lahko tudi drugačne rešitve s peno, gumo (elastikami) ali trenjem ob les.
- Nihalo naj bo zmožno nihanja zgolj v smeri premikanja potresne mize, saj bo tako poskus bolj obvladljiv.
- Učinek dušenja potresnega sunka opazimo tudi s prostim očesom, vendar za primerjavo vseeno snemajmo poskus s kamero telefona.

Dodatno

- Nihanje zgradbe se lahko zgodi v poljubno smer. Pri našem poskusu nam to onemogoča podlaga iz valjev. Težavnost lahko povečamo, če valjaste cevi zamenjamo s ping-pong žogicami, elastike pa vpenemo v vse štiri smeri. Uporabiti bomo morali več žogic, da te pod težo knjig ne bodo popustile. Okovje vpenjala zgradimo iz odtočnih cevi ali lesenega okvirja slik.
- Nihalo ni edina rešitev za umirjanje velikanov. Namesto tega lahko na vrh knjige postavimo utež, ki je z elastikami vpetja na stolpnico z vseh štirih smeri. Trenje med utežjo in knjigo bo povzročilo zadostno dušenje nihanja. Utež lahko prilagajamo z dodajanjem vijakov ali matic, trenje pa spreminjamo z izbiro različnega papirja, ki je lahko podlaga med utežjo in knjigo (povoščene reklame, časopisni papir, karton, alu-folija).

**Vprašanja za razmislek**

- V katero smer se premakne stolpnica in v katero smer nihalo, ko prvič sprožimo potres?
- Kaj se zgodi, če je nihalo pretežno, kaj če je prelahko?
- Kaj se zgodi če stolpnici z nihalom odstranimo zgornjo knjigo?
- Kaj se zgodi, če po celotni višini stolpnice dodamo prečne povezave (po diagonali stranic), ki jih na vse robove pritrdimo z lepilom za vroče lepljenje?
- Kakšni so še načini umirjanja nihanja stolpnic?
- Ali za sodobno stolpnico nihanje zgradbe ob potresu predstavlja nevarnost za njeno zrušitev?
- Od katerega leta dalje v Sloveniji velja zakon, ki zapoveduje gradnjo potresno varnih zgradb? Po katerem potresu je zakon stopil v veljavo?
- Koliko v višino meri najvišja stolpnica v Sloveniji?