

KAKO SU I ZAŠTO PALI TORNJEVI WORLD TRADE CENTRA

Stravični samoubilački teroristički napadi 11. rujna 2001. na tornjeve blizance World Trade Centra u New Yorku (WTC) zaprepastili su svijet. Prizori avionskih pogodaka i rušenja golemih tornjeva postali su dio svačije svijesti. Ta je velika tragedija s puno ljudskih života mnogo toga promijenila u suvremenom svijetu. Uzrokovala je jedan rat i nepovoljne gospodarske posljedice, ali i razmatranja što bi trebalo učiniti da se slične nesreće spriječe. Uz borbu za sprječavanje terora u svim dijelovima svijeta započele su i rasprave među stručnjacima o pitanjima može li se što učiniti da se štete od sličnih nesreća, prvenstveno gubici ljudskih života izbjegnu ili barem smanje. Između ostalog raspravlja se i o razlozima relativno brzog rušenja tornjeva nakon napada. Jesu li tome pridonijela i neka graditeljska rješenja?

Od mnogobrojnih rasprava znanstvenika i stručnjaka koje su se tim povodom održale, ili će se još održavati, izabrali smo raspravu u sveučilišnom kampusu MIT-a (*Massachusetts Institute of Technology*), održanu mje



Pogled na dio New Yorka i zgrade World Trade Centra

HOW DID THE TWIN TOWERS COLLAPSE

Terrorist suicidal airplane attacks that ravaged on September 11, 2001 twin towers in New York and the Pentagon building in Washington D.C. also caused many human casualties. This attack has changed the modern history as it marks the onset of the global war against terrorism. Several months after this unfortunate event, discussions were initiated about how the famous towers of the World Trade Center in New York collapsed and whether the collapse was due to some structural deficiencies. During the round table discussion held at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), renowned scientists and experts concluded that structural quality of the buildings can not be disputed and that no building could have withstood an impact of such type and intensity. However, the structure stood long enough to permit evacuation of most people from the burning towers.

sec dana nakon napada, a objavljenu u časopisu *Scientific American*. Me



Dio Manhatana s označenim položajima srušenih tornjeva i odlagališta ruševina

hanizme koji su uzrokovali pad golemih i vrlo čvrstih građevina na raspravi u gradicu Cambridgu blizu Bostona razmatrali su građevinski inženjeri-konstruktori pred punim auditorijem. Stroga i trijezna analiza istaknula je veliku ranjivost od vatre ovakvih super visokih građevina, ali i pokušala utvrditi načine kojima bi se to moglo smanjiti.

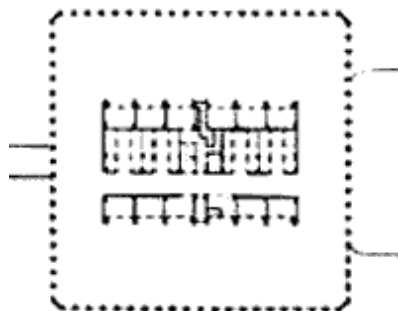
U raspravi su opisani konstrukcijski sustavi koji su držali dva tornja blizanca od 110 katova. Sustav je već uspješno odolio jednom terorističkom napadu kamionskom bombom. Okupljeni su eksperti opisali slom cijelog sustava, a iznijeli su i nekoliko verzija kako se i zašto to zapravo dogodilo. Na kraju su govorili i o

načinima kako se slične tragedije mogu spriječiti odnosno kako se mogu smanjiti razmjeri tolikih tragedija.

Glavni uzrok pada tornjeva nije uopće bio sporan. To su visoke temperature izazvane pakleno snažnim eksplozijama od desetina tisuća galona avionskog goriva koje su nosili uništeni zrakoplovi. Visoke su temperature istopile nosivu čeličnu konstrukciju tornjeva pa je bilo samo pitanje kada će masa u gornjim dijelovima pokrenuti "palačinka" fenomen slaganja katova jednog na drugog i dovesti do pada svega na tlo. U raspravi je zaključeno da nikakva pridodana pojačanja na tim zgradama ne bi mogla spriječiti neizbježan slom, ali dobra konstrukcija je ipak omogućila odgađanje rušenja za kratko vrijeme što je pomoglo evakuaciju dijela onih koji su se u tornjevima zatekli. No ni jedna postojeća ili predvidljiva, a ekonomski održiva, neboderska konstrukcija, zaključeno je u raspravi, ne bi mogla odoljeti tom strahovitom udaru. Jedinstveno je mišljenje da je sprječavanje, očito, najbolja obrana protiv takvih napada.

Neboderi blizanci nisu mnogo viši od svog slavnog prethodnika *Empire State Buildinga* (391 m), koji je izgrađen početkom tridesetih godina prošlog stoljeća i dugo vremena bio najviša svjetska građevina. Čak su i

Twin Towersi (ime po kojemu su poznati u cijelom svijetu) neko vrijeme, iako vrlo kratko, bili najviši na svijetu. Građeni su u sedamdesetim godinama, u novom razdoblju konstruktorskog razvoja kojega je karakteriziralo sve češće podizanje lakših čeličnih konstrukcija, umjesto teških masivnih betonskih i zidanih građevina. Rekao je to u raspravi Robert Fowler, vodeći inženjer u konstruktorskoj tvrtki *McNamara i Salvia*. Posebno je istaknuo Leslie E. Robertsona kao voditelja projekta, najistaknutijeg inženjera za konstruk-



Tlocrtni presjek jednog tornja

jednog od tornjeva bila još 30,5 m visoka i 62,5 m široka antena. Približna maksimalna sila vjetrova koju je svaka strana morala izdržati bila je

građevinu i središte cijevi dolje u sredini.

Središnja jezgra, s promjerom od 27,4 m, bila je formirana od jakih čeličnih stupova koji su držali najveći dio težine građevine, a u jezgri su bili dizala, stubište i druge pomoćne prostorije. Stupovi jezgre postajali su sve deblji prema dnu zbog prihvaćanja povećanih opterećenja. Vanjski veliki cijevni plašt bio je čvrsta predgotovljena rešetka sa stupovima sandučastog presjeka na svakom pročelju zgrade koji je osiguravao otpornost protiv poprečnih i torzijskih sila od vjetrova i potresa. Taj je vanjski roštilj prihvaćao okvirne momente i osiguravao veliki moment protiv prevrtanja i progiba. Plašt vanjske cijevi također je prenosio dio gravitacijskog opterećenja.

Goleme unutarnje i vanjske pravokutne cijevi trebale su zaštititi održavanje cjelovitosti konstrukcije tako isto su stropovi djelovali kao ojačane dijafragme ili "neprobojne pregrade" (termin koji se rabi u brodogradnji) istaknuo je u raspravi Jerome Connor, profesor građevinarstva i ekološkog inženjerstva na MIT-u. On je obrazložio da su uredski katovi, od kojih je svaki imao 10,67 do 18,29 metara svijetlog raspona od jezgre do vanjskog roštilja, bili ploče poduprte otvorenom mrežom poprečnih greda s čeličnim pločama nad njima. Horizontalne su grede bile pričvršćene i zavarene na vanjski roštilj i na konstrukcijsku jezgru što je, uključujući

TWIN TOWERS

osnovni podaci

Visine: 417 m (sjeverni toranj), 415 m (južni toranj)

Vlasnici: Port Authority iz New Yorka i New Jersey (zakupljeno na 99 godina od grupe korisnika na čelu s *Westfield America* i *Silverstein Properties*)

Arhitekt: Minoru Yamasaki, *Emery Roth & Sons consulting*

Projektanti konstrukcije: John Skilling i Leslie Robertson, *Skilling, Helle & Jackson*, *Worthington*

Početak gradnje: 5. kolovoza 1966., **Puštanje u upotrebu:** od 1970.-1973.

Svečano otvaranje: 4. travnja 1973.

Prvi napad dogodio se: 26. veljače 1993., eksplozija kamiona bombe u garaži

Uništeni od udara zrakoplova: 11. rujna 2001.

ciju super nebodera koji je danas glavni konstrukcijski savjetnik u WTC-u.

Kao i kod svih visokih građevina valja zadovoljiti dva glavna konstrukcijska zahtjeva. Prvenstveno treba osigurati stabilnost za preuzimanje golemih gravitacijskih opterećenja i protiv bočnih sila od snažnih vjetrova i od djelovanja potresa. Uvjeti građenja propisivali su jake vertikalne stupove koji mogu djelotvorno prenijeti težinu zgrade na tlo. Između ostalih je i uvjet koji se ne tiče samo konstrukcijske stabilnosti, ali zahtijeva prihvatljivu razinu komfora i izbjegavanje jakog ljuljanja.

Visina tornjeva bila je 415 m iznad razine ulice, temelji su konstrukcije smješteni 21 m u tlo, dok je na vrhu

otprilike 242.550 kN. Opterećenje tornjeva na tlo iznosilo je približno pola milijuna tona.

Za prihvaćanje tih golemih opterećenja inženjeri su konstruirali tornjeve World Trade Centra ponajprije kao velike gredne presjeke, objasnio je sljedeći sudionik u raspravi Robert McNamara, predsjednik inženjerske tvrtke *McNamara i Salvia*. Iako poslovno nazvani konstrukcijskim cijevima, svaki je od tornjeva bio jaka okvirna čelična konstrukcija. Okvir se sastojao od unutarnje i vanjske pravokutne sandučaste cijevi koju su sačinjavali zbijeni čelični sandučasti stupovi povezani čeličnim gredama koje su pridržavale više od 3700 četvornih metara križno napetih stropova. Ta je konfiguracija učvršćivala vanjsku cijev koja je obuhvaćala



Grafčki prikaz pogotka zrakoplova u sjeverni toranj

strukcijsku jezgru što je, uključujući i viskoelastičnu užad, osiguravalo prigušivanje i pomagalo da konstrukcija lakše podnosi djelovanje vjetra. Svaka je čelična podna ploča bila pokrivena sa 6 mm betona. Na nešto više od 3700 m² površine i s težinom od približno 2200 kg/m², procijenjeno je da je svaka stropna konstrukcija imala više od 8 milijuna kilograma.



Trenutak urušavanja

Sa svojim su konstrukcijskim rješenjima tornjevi WTC-a bili vjerojatno jedna od najotpornijih građevinskih konstrukcija, utvrđeno je u raspravi.

Taj stav podupire i činjenica da je nosiva konstrukcija oba tornja u početku odoljela pogocima zrakoplova, unatoč njihovu prodiru kroz više razina katnih konstrukcija. Uništeni su ključni konstrukcijski dijelovi od devedesetog do devedesetšestog kata sjevernog pročelja sjevernog tornja i od sedamdesetpetog do osamdesetčetvrtog kata na južnom, istočnom i sjevernom pročelju južnoga tornja

Konstrukcijski sustav obaju tornjeva pronašao je alternativne načine preuzimanja opterećenja. Ocijenjeno je da su građevine pokazale veliku otpornost unatoč ozbiljnim oštećenjima stabilnosti dijela sustava.

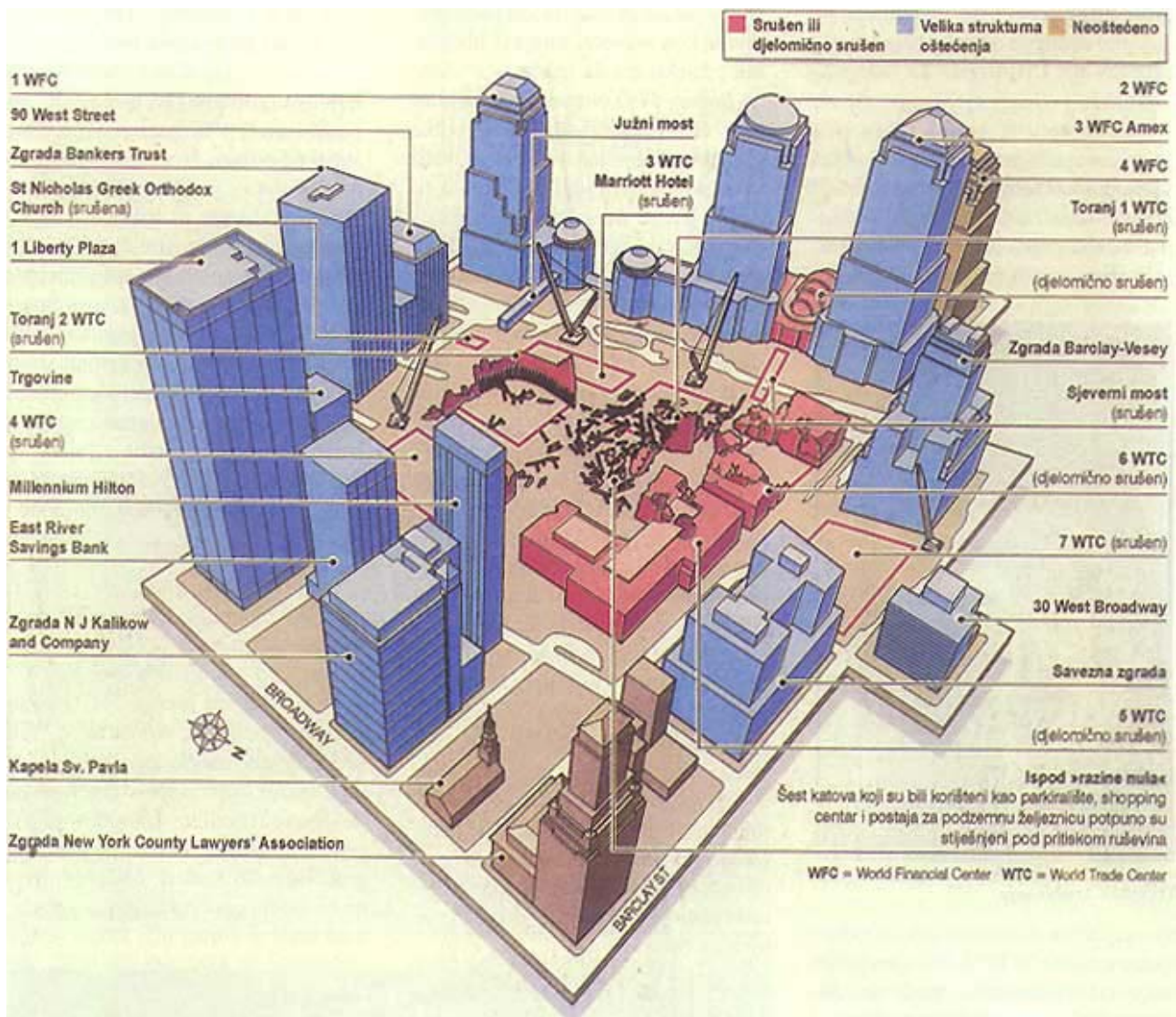
Navodno su, prema izvještajima medija nakon nesreće, tornjevi blizanci bili projektirani da izdrže udar aviona *Boeing 707*. No oni ipak nisu nikad bili konstruirani tako da odole snažnim eksplozijama i snažnoj vatri avionskog goriva koja je potom uslijedila. To je po mišljenju Eduarda Kausela, također profesora građevinarstva i ekološkog inženjerstva s MIT-a, ključni razlog kolapsa. Prema njegovu su se mišljenju tornjevi srušili samo zato što je vatra kerozinskog goriva ugrozila stabilnost konstrukcijskog sustava pa je jedan toranj izdržao 105, a drugi samo 47 minuta. U raspravi je to tumačio već spomenuti ing. McNamara tvrdnjom kako se u projektiranju računalo na vatru koja se može očekivati u jednom uredu, dakle na vatru izazvanu paljenjem papira, namještaja, zavjesa... Vatra s kerozinskim gorivom došla je izvana i nije tipičan sadržaj ureda. Pritom je istaknuo da pri temperaturi od približno 430⁰ C nosiva čelična konstrukcija počinje gubiti svoju čvrstoću, a kod 850⁰ C čelični dijelovi postaju značajno oslabljeni. No ipak postoje određene opravdana pitanja vezana uz protupožarnu zaštitu čelične konstrukcije, utvrđeno je tijekom rasprave.

Isticana je i mogućnost da je vatra iz avionskog goriva bila toliko jaka da je rastalila i zapalila i aluminij zrakoplova. Aluminij je inače vrlo zapaljiv metal i njega treba posebno štititi od požara. Vrući rastaljeni aluminij, isticao je jedan dobro obaviješteni sudionik u raspravi, mogao se pojaviti kao dodatni zapaljivi materijal koji se probijao kroz dijelove konstrukcije. Osim toga, a pretpostavlja se da je aluminij gorio na temperaturi od 1800⁰ C, u betonu su se stvarale male zapaljive aluminijske "barice" koje su oduzimale vodu iz betona i stvarale vodik. Takva su duboka oštećenja u betonu zapažena kod zapaljenog iračkog borbenog zrakoplova tijekom rata u Perzijskom zaljevu.

Putnički zrakoplovi *Boeing 767*, koji su pogodili tornjeve blizance, nešto su veći od starog tipa *Boeing 707* (871 t u odnosu prema 741 t) čijim je udarima, kažu, konstrukcija po proračunima mogla odoljeti. Ali ti zrakoplovi sadržavaju slične količine goriva (otprilike 109.000 l u odnosu prema 105.000 l), pojasnio je prof. Eduardo Kausel. Ističe do tome ne bi mogla odoljeti ni jedna zgrada, a od male je koristi bilo kakav sustav



Ruševine World Trade Centra



Prikaz mjesta tragedije s označenim ruševinama i oštećenjima

vatrozaštite. Sreća je ipak da je konstrukcija izdržala neko vrijeme da se jedan dio ljudi zatečenih u tornjevima mogao evakuirati.

Prof. Kausel je govorio i o procjenama količine energije koja se razvila tijekom sloma svakog tornja. Istaknuo je kako gravitacijska energija zgrade nalikuje vodi zadržanoj ispred brane. Kada se oslobodi, akumulirana potencijalna energija pretvara se u kinetičku. Izračunao je da je s masom od otprilike 500.000 t, s visinom od 411 m i ubrzanjem sile teže od $9,8 \text{ m/s}^2$ potencijalna energija iznosila

10^{19} erga (10^{12} džula ili 278 megavat sati). To je približno 1 posto energije koja se oslobađa malom atomskom bombom. Taj je profesor s MIT-a dodao kako je 30 posto energije sloma utrošeno na slamanje materijala, dok se ostatak pretvorio u kinetičku energiju. Golemi oblak sive prašine pokrio je taj dio Manhatana. Samo se 0,1 posto kinetičke energije koja je djelovala na tlo pretvorio u seizmičku energiju. Taj je potres zabilježio seizmički opservatorij obližnjeg Sveučilišta Columbia. Najveći se dio kinetičke energije pretvorio u toplinu.

Razloge i mehanizme sloma tornjeva i dalje ispituju mnoge skupine znanstvenika i stručnjaka brojnih institucija u Americi. Posebne je skupine za ispitivanje svih vidova tragedije WTC tornjeva utemeljilo Američko društvo građevinskih inženjera (ASCE), ali i brojna druga udruženja i instituti za sigurnost svih vrsta konstrukcija (posebno čeličnih) i za zaštitu od vatre. Konačni izvještaji dobit će se tek nakon temeljitih i preciznih istraživanja.

Sudionici rasprave u MIT-u ponudili su nekoliko vlastitih gledišta. Uglavnom svi se slažu da je konstrukcija

KRONOLOGIJA DOGAĐAJA 11. RUJNA 2001.

- u 8,45 sati oteći avion Boeing 767 *American Airlines* (broj 11 na liniji od Bostona do Los Angelesa sa 92 putnika i člana posade) pogodio je sjeverni toranj.
- u 9,03 sati avion Boeing 767 *United Airlines* (na liniji 175 od Bostona do Los Angelesa sa 65 putnika i članova posade) pogodio je južni toranj
- u 9,43 sat Boeing 757 *American Airlines* (na liniji 77 na liniji Washingtona do Los Angelesa sa 64 putnika i člana posade) pogodio Pentagon.
- u 10,05 sati srušio se južni toranj World Trade Centra.
- u 10,10 sati Boeing 757 *United Airlines* (na liniji 93 od Newarka u New Jerseyu do San Franciska) srušio se blizu Somerset Couna, južno od Pittsburga
- u 10,28 sati srušio se sjeverni toranj
- u 5,20 sati srušio se Toranj 7 World Trade Centra visok 47 katova.

izgubila nosivost u udarenim katovima te da je golem teret dinamičkim udarima djelovao na donje dijelove konstrukcije. Detalje kako su se dijelovi urušavali još valja istražiti.

Prof. Connor pažnju je usmjerio na slabosti u vertikalnim i horizontalnim međusobno povezanim dijelovima konstrukcije. Kad propadne jedan oštećeni katni sustav, on kida rubne veze na nižim katovima i sve se tako nastavlja do dna. Velika je vatra, smatra taj profesor, oslabila zajedničke veze jedne katne konstrukcije. Kada su popucale, jedan je kraj pao, ošteti katni konstrukcijski sustav ispod te lančano povlačio vertikalne napadnute elemente prema središtu i prema dolje.

Prof. Kausel ponudio je ponešto alternativno tumačenje sloma, i napomenuo da je i prof. Zdenek Bazant sa Sveučilišta Northwestern neovisno od njega dao slično tumačenje. On vjeruje da je jaka toplina omekšala ili rastalila elemente konstrukcije - stropove i stupove - tako da su postali kao sažvakana žvakaća guma. To je bilo dovoljno za početak sloma. Čim su gornji katovi ostali nepridržani, propali su na katove ispod sebe, što je konačno otvorilo put nezaustavljivu padu. Dinamičke su sile jednostavno postale prevelike za projektirano opterećenje i predviđeni stupanj

sigurnosti. Prof. Kausel je to ilustrirao s dva jednostavna modela i jednom kompjutorskom simulacijom. Zaključio je da u takvim slučajevima tereti padaju praktički nesputano, slobodnim padom. Prema tom stajalištu materijal je s vrha padao oko devet sekunda.

I ostala iznesena gledišta zapravo su bila vrlo slična. Oral Bayukozturk, još jedan od profesora građevinarstva i ekološkog inženjerstva s MIT-a, tvrdio je da je teško procijeniti koji se od tih mehanizama dogodio prvi, a možda se sve dogodilo i djelovalo istodobno. Visoka je toplina vjerojatno pridonijela gubljenju nosi-

ve sposobnosti stupova i slamanju stropnih konstrukcija, a tome je pridonijelo i slamanje konstruktivnih veza. Ujedno je istaknuo kako snimci katastrofe pokazuju određeno nagnjanje gornjeg dijela južnog tornja prije sloma. Potom je slijedio dinamički udar s ubrzanim procesom prema slomu. Dogodio se efekt "palačinki", slaganje ploča kao karata, sve do razine tla.

Jedan je sudionik u raspravi, čije je ime ostalo nepoznato, provokativno istaknuo kako se za samo 10 posto većih ulaganja od konačne cijene građenja mogla značajno ojačati stropna konstrukcija i za nekoliko sati produžiti vrijeme sloma te spasiti sve one koji su se zatekli u tornjevima. Ako je svaki toranj stajao otprilike milijardu dolara, onda se za još 100 milijuna dolara moglo sačuvati sve ljudske živote.

Od brojnih pitanja upućenih okupljenim stručnjacima svakako je najzanimljivije ono da li bi se dogodilo isto da su oteći putnički zrakoplovi na isti način udarili sadašnju najvišu zgradu na svijetu - 452 metra visok *Petronas Towers* u Kuala Lumpuru u Maleziji. Odgovoreno je da bi betonska konstrukcija vjerojatno izdržala nekoliko sati više, ali da bi se ipak srušila. Ing. McNamara je dodao kako su mnogi suvremeni super-



Šest tjedana nakon tragedije i dalje je tinjala vatra

neboderi u Aziji građeni od armiranog betona jer je u Aziji čelik mnogo skuplji. Istaknuo je da *Petronas Towers* ima tzv. "sigurnosne katove" s dovodom svježog zraka u slučaju potresa. No taj je koncept pomalo kompromitiran jer slična zaštita u WTC-u nije zaista nikoga spasila.

Raspravljalo se i o tome jesu li piloti teroristi znali gdje treba pogoditi u građevinu da bi se postigli najveći učinci. Utvrđeno je da su zaista pogodili na pravo mjesto, približno na dvije trećine jednog i na tri četvrtine visine drugog tornja. Da su pogodili sam vrh zgrade, šteta od vatre ne bi imala takav katastrofalni učinak. Vjerojatno je u izboru načina i mjesta napada sudjelovao fakultetski obrazovan inženjer ili što je još vjerojatnije cijeli ekspertni tim posebno uvježban za slične terorističke akcije.

Na kraju je rasprava zaključena razmatranjima što bi trebalo učiniti da se slične nesreće spriječe te da se visoke građevine zaštite od sličnih

nesreća. Vjerojatno će postojeće nebodere biti potrebno rekonstruirati i zaštititi dodatnim mjerama, iako se pritom valja brinuti o gospodarskim i o estetskim razlozima. Jednostavno je nemoguće izgraditi zgradu koja se neće moći srušiti, ali je važno osigurati da ostane stajati dovoljno dugo da bi se moglo spasiti ljude u njoj. Onda kada su građeni WTC tornjevi nitko nije mogao očekivati da će biti potrebna praktički trenutačna evakuacija. Mnogo se govorilo o poboljšanju protupožarne zaštite elemenata konstrukcije, alternativnim vezama za prihvaćanje opterećenja od oštećenih dijelova konstrukcije i boljem učvršćivanju grednih nosača u vertikalne stupove. Spominjala se i ugradnja na mine otpornijih i energetski upijajućih materijala, poput čelikom obloženih armiranobetonskih stupova ili šupljih armiranobetonskih jezgra. Mnogo se govorilo i o sustavima komunikacija u opasnosti, signalizaciji i zaštiti od dima koji je u takvim nesrećama najveći

ubojica. Govorilo se i o primjeni vodenaste pjene koja se rabi u putničkim zrakoplovima, ojačanim stubištima i posebnim sustavima za evakuaciju, poput robotiziranih uređaja, posebnim cijevima koje bi se priključivale na prozore, posebnim padobranima, letećim platformama...

Nije razmatrano pitanje treba li, unatoč stradanju tornjeva blizanaca World Trade Centra, i ubuduće graditi super visoke građevine. Očito da bi odgovor okupljenih vrhunskih stručnjaka bio potvrđan. Rekli su da će visoki tornjevi i dalje podizati.

Priredio: B. Nadilo

IZVORI

- [1] Explorations: When the Twin Towers Fell, *Scientific American*, 9. listopada 2001.
- [2] September Eleventh: The Days After, the Days Ahead, *Civil Engineering*, studeni 2001.
- [3] Internet