

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építészmérnöki Kar

TDK konferencia 2011

A SOPRONI TŰZTORONY FA TORONYSISAKJÁNAK ERŐJÁTÉKA



Szerző: Tóth Zsuzsa, Máté Albert

Konzulensek: Dr. Sajtos István, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Dr. Armuth Miklós, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Dr. Lajos Tamás, Áramlástan Tanszék

Balczó Márton, Áramlástan Tanszék

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. A tornyok és a Soproni Tűztorony története	3
2.1. A tornyok fejlődéstörténete, szimbolikája	3
2.2. A Soproni Tűztorony története, fejlődése	5
2.2.1. A toronysisak faszerkezetének jelenlegi állapota	10
2.3. Toronysisakok szerkezeti fejlődése	13
2.4. A Soproni Tűztorony szerkezete, korábbi felmérés pontosítása.....	17
3. A szél hatása az épületekre	18
3.1. Épület körüli áramlások	19
4. Aerodinamikai vizsgálatok szélcsatornában	20
4.1. Áramlástan (fogalmak)	20
4.2. Szélcsatornában végzett mérések	22
4.2.1. A szélcsatornában létrehozott áramlás	22
4.2.2. A modell.....	25
4.2.3. Méréstechnika	26
4.2.4. Mérési eredmények	32
4.2.5. Vizualizáció	42
5. Végeselem-modell	46
5.1 A szélterhek meghatározása.....	46
5.2 A végeselem-modell	47
5.3 Eredmények	48
6. Összefoglalás	51
7. Köszönetnyilvánítás	52
8. Irodalomjegyzék.....	52
9. Ábrajegyzék	54
MELLÉKLETEK.....	57

1. Bevezetés

A dolgozat célja, hogy bemutassa a soproni Tűztorony fa toronysisakjának történeti kialakulását, jelenlegi állapotát és a sisak erőjátékát szélteher esetén.

A dolgozat tartalmazza a fa tornyok általános fejlődéstörténetét, a különböző toronytípusok kialakulását, illetve a Tűztorony építésének, szerkezetének történeti áttekintését. A soproni Tűztorony fedélszéke kilátó szinttel gazdagított, több császárfára szerkesztett „hagymás” toronysisak, mely jelenlegi formáját az 1676-os tűzvész után kapta meg, mely tűzben a torony teljesen leégett.

A fa toronyszerkezetről készített régebbi felméréseket helyszíni vizsgálatok során pontosítottuk, kiegészítettük. A korrigált felmérés alapján 1:75 léptékű modellt építettünk, melynek segítségével szélcsatorna vizsgálatokat végeztünk a BME Áramlástan Tanszék Kármán Tódor laboratóriumában. A mérési eredmények felhasználásával meghatároztuk a toronyra ható szélteher nagyságát és eloszlását.

A korrigált felmérés alapján elkészítettük a Tűztorony fedélszékének háromdimenziós építészeti és mechanikai számítógépes modelljét, és végeselem programmal ellenőriztük állékonyságát szélteherre, illetve meghatároztuk a szerkezetben fellépő igénybevételeket.

2. A tornyok és a Soproni Tűztorony története

2.1. A tornyok fejlődéstörténete, szimbolikája

Az építészeti formák közül a torony a leginkább elvonatkoztatott, már-már képletes építészeti forma. Használati, gyakorlati jelentősége csekély, jelentősége a hasznossággal fordítottan arányos. A tornyok javarészt eszmei funkciójuk, jelentésük miatt épülnek. A torony csupán bizonyos magasság elérése céljából kap formát, csak külső tere van és a toronytest az esztétikai hatás miatt homogén tömb. Ez az építészeti forma antropomorf. Gyakran emberi neveket kapnak és emberi tulajdonságokkal jellemzik őket (pl. a Big Ben, London; Salamon-torony, Visegrád). Azon kívül, hogy önmagukban szimbólumok, általában címert vagy jelvényt viselő, mutató funkciójuk is van. A tornyok hangsúlyoznak valamit, mint a mondat végén a felkiáltójel. Szimbolikus jellege és ennek következtében a formája miatt nehezen elegyíthető más építészeti műfajokkal. A torony „kifelé-élő” formájából következően nehezen simul bele környezetébe. Nem illeszkedik, hanem uralkodik. Magasságánál fogva mindig távolabbi térre utal. Falut, várost, teret és tájat a tornya

jellemezhet leginkább, mely környezetéből kicsúcsosodva, magába szívva annak tulajdonságait, távolabbra is megmutatja környezete hangulatát, jellegét.

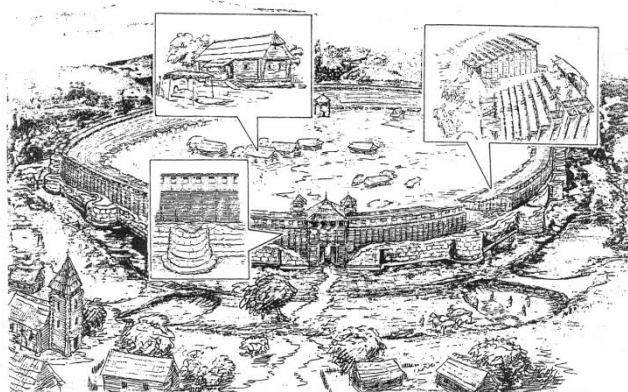
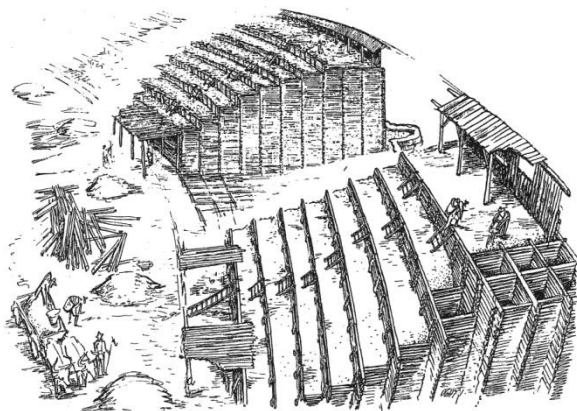
A toronyépítés legrégebbi példái szakrális céllal épültek. Mezopotámiában a IV. évezredben épült úri toronytemplomot és később épült babiloni tornyot ma már mindenki ismeri. Vallási céllal épültek a távol-keleti és indiai tornyok is. Az ókori egyiptomi és a görög kultúrában a toronyépítésnek nincs hagyománya. Ez a forma idegen a görög világképtől, művészettől. Az ókori római építészet korai szakaszában is mellőzik a tornyok tervezését, építését, de a késői, császárkori római építészetben uralkodói jelvénné válik a kupolával koronázott torony. Ebben a korban fontos államhatalmi jelentése van a toronnyal rendelkező épületeknek, építményeknek. A középkorban a tornyok új vallásos jelvényrendszerét a katedrálisok testesítik meg. Sajátos csoportot alkotnak az olasz városokban épült családi, nemzetségi tornyok.

Napjainkig terjedő jelvényrendszere van a városházák tornyának, mely szinte egész Európára jellemző. Többféle világi, hatalmi, társadalmi értelem hordozója a várkastélyok és várszerű paloták toronydísze. Az egyházi építészetben a toronyépítés máig az egyik legfontosabb építészeti elem. Természetes, hogy a tornyok vallásos és hatalmi jelentése egymáshoz illeszkedik, egymással keveredik.

Minden város vagy falu képét tornyai határozzák meg. A tornyok világiasodása Magyarországon lassan halad. A pozsonyi városháza vagy a felvidéki várostornyok a XVII-XVIII. században mind templomtornyszerűek. Az egykori győri tűztorony, mintegy a város címer-épülete, a nagykőrösi városháza tornya, majd a szegedié, mind a kapuépítményre, illetve a városházákra helyezett, talapzatukról lementszett templomtornyok. A hagymasisakok, lizénák, párkányok a városi hatalomról „beszélnek”. A Soproni Tűztorony Sopron város tornya, szimbóluma, olyan, mintha a mellette álló városházához tartozna. A formájában és tartalmában is valóban profán torony Magyarországon csak a klasszicizmussal tűnik föl a városházák homlokzatán. Példa erre az egykori pécsi városháza és a régi pesti városháza tornya. A városházák esetében a tornyos hagyomány napjainkig él. Az építészeti hangsúlyt és városképet meghatározó torony napjainkban is foglalkoztatja a tervezőket. (Mojzer, 1971.)

2.2. A Soproni Tűztorony története, fejlődése

A III. század végéig nyílt településként létező Scarbantia védelmére IV. század elején megépült a római városfal. A szabálytalan ellipszis alakú falgyűrűn 31-32 vasaló alakú bástya, a négy nagyobb törésponton egy-egy kerek fiatorony volt kialakítva. A későbbi Borostyánkő út volt a város főutcája és tengelye, melyen keresztül a település két kapuval csatlakozott a külvilághoz. A kapuk két-két kör alakú bástyával voltak erősítve, melynek egyikére részben ráépült a Tűztorony. Az északi kapu maradványai láthatóak az 1967-73 között épült Tűztoronyhoz csatlakozó múzeum pincéjében. Az ásatásokat Holl Imre régész végezte. A Római Városfal szélessége átlagosan 2,4 m széles volt. A falak erőteljes nagyobb külső- és kisebb belső kváderkövekből épültek, lábazattal és külső köpennyel. A fal belseje mésszel szilárdított, apróbb, szabálytalan fertőrákosi kövekből készült. A fal magassága nem ismert, erre vonatkozóan Hajnóczy Gyula elméleti rekonstrukciói adnak elképzelhető támpontot. A Római Fal a IX. századi honfoglalás időszakára lepusztult, láthatóvá vált a belső mag. A X. században vármegyerendszer épült ki, határvédelmi várakat építettek. A XI. században a római falmaradványokhoz belülről a római fal felé lépcsőzetesen emelkedő, agyaggal kitöltött, cellás gerendavázás sáncot építettek. Az így kialakuló vár kapujaként a Római Kapukat használták. A sánc a régészeti feltárások szerint 15 m szélességű, átlagosan 7,5 m magasságú lehetett. (1. és 2. ábra)



1. ábra A soproni sánc elméleti rendszere (forrás: Gömöri) 2. ábra Sopron vára a XI. században (forrás: Gömöri)

A sánc XII. század elején leégett, a földben lévő faserkezetek izzása és magas hőmérséklete az agyagot kiégette, innen ered mai elnevezése: „vörös” sánc. A sánc fa szerkezeti rendszere megroskadt. A sánc maradványai a római fal mentén egy tömör, kemény, agyagos, cserepes vörös színű halommá vált.

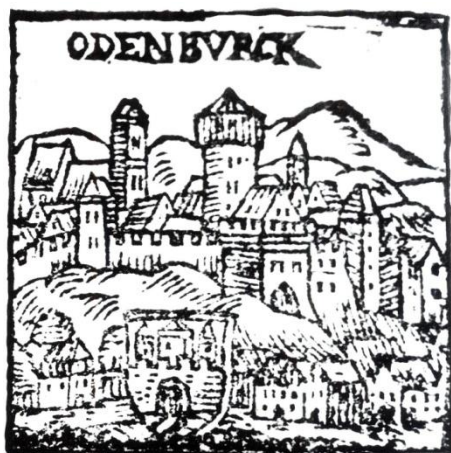
Korabeli írásos dokumentum szerint a XIII. század végi királyi rendelet hatására, a hármas falrendszer körülbelül 60 év alatt kiépült. 1339-ig elkészült a hármas falrendszer, a Tűztorony, illetve a kaputorony. A hármas falrendszer a IV. századi Római Városház fal nyomvonalát követi és felhasználja a megmaradt római falakat, valamint az ahhoz belülről kiépített fa földsánc XII. század végén kiégett maradványát-a „vörös” sáncot. Az 1,6-1,8 méter széles legbelső városház fal a XIII. század végén „vörös” sánc tetejére alapozva a belső sánc szintjéhez képest körülbelül emeletmagasságban indulva épült ki felső szintjén gyilokjáróval. A belső városház fal pártázatos tetejének a gyilokjárójáról lehetett bejutni az első emeleti bejáraton a toronyba. Az ide felvezető lépcső - mint azt későbbi ábrázolás is mutatja - az alapfalaiban megmaradt börtön mellett helyezkedett el.

A XIV. század elején az 1339-ig épült középső városház fal a római falra épült, mintegy 60-80 cm-es vastagságban, kezdetben pártázattal, későbbi átépítésekben lőrészekkel magasztva. A külső városház fal is ebben a 60 éves időszakban épült, esetleg felhasználva egy római kori fal nyomvonalát, amely talán a IV. századi városház fal előtt is megvolt, az I. századtól említett nyílt város védelmére.

Az Északi kaputorony földszinti átjárója fölötti helyiség a csapóhíd és a felvonók működtetésének fontos helyszíne volt. A kapuívек boltozata a négyzetes toronyrész és a későbbi magasztások vastag falának súlyát hordja. A boltvállakhoz csatlakozó, a toronnyal egyidőben készült belső és középső városház falak a boltvállakban fellépő vízszintes erőket felvették, támaszként működtek.

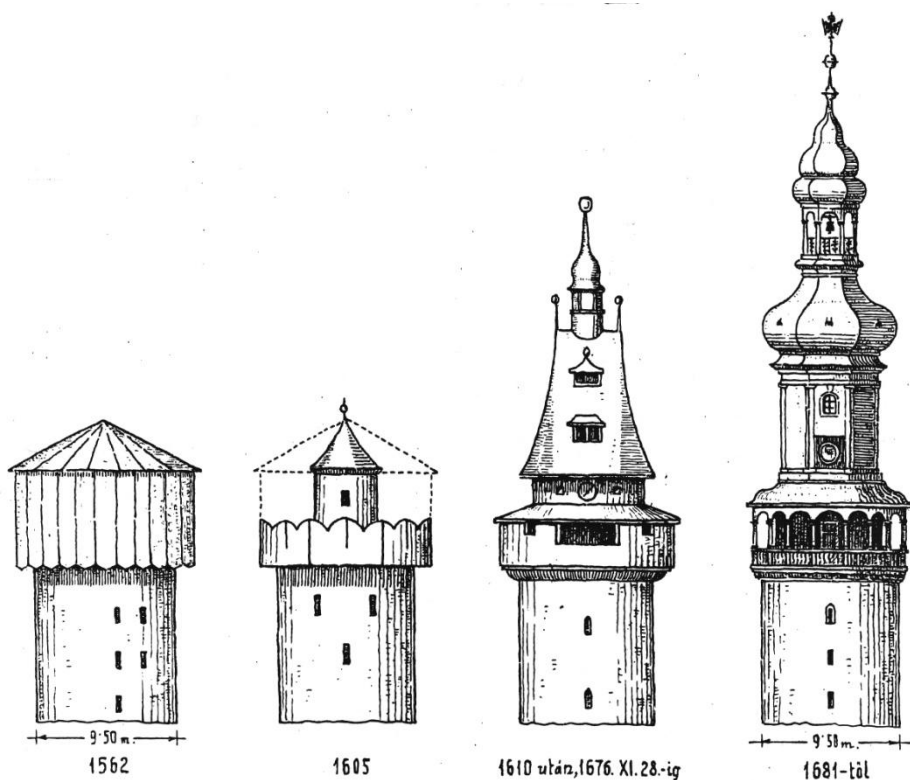
A Tűztorony alapozása részben a Római falon nyugszik. A torony alapozási síkja megegyezhet a Római faléval, de az alapozási sík nem ismert. Az utolsó száz évben működő szakértők 6-8 méterre teszik, feltehetően a Városház alapozásáról látottakra hivatkozva.

A Tűztorony első írásos említése 1409-ben volt. A Tűztoronyt először 1562-ban ábrázolták egy bécsi naptár címlapján, mely a XVI. századi állapotot mutatja be. A torony hengeres része fölött a falsík elé kiugró deszka burkolatú fedett mellvéd látható. (3. ábra)



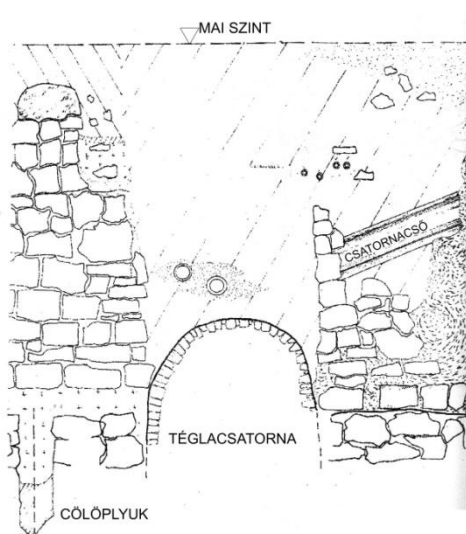
3. ábra Sopron képe az 1562-től megjelenő bécsi naptárakban (Soproni Múzeum fotótára, 35146)

1590-ben Sopronban földrengés volt, mely valószínűleg több károsodást okozott az épületben. 1676. november 28-án a Tűztorony teljesen leégett. A lakosság sürgetésének ellenére csak 1680-ban kezdődött meg a helyreállítás. 1681-re elkészült a loggia, a kétszintes nyolcszögű toronymagasítás az órával, de az építés a következő évben is folytatódott. A mai toronysisak évekkel később készült el, mely közel egyharmadával nyújtotta meg a tornyot. (4. ábra) A fa toronysisakban újabb loggia-szint valósult meg. A folyamatos magasítások terhei továbbra is a Római és a XIII. századi alapokra terheltek.



4. ábra A soproni Várostorony alaki változásai (forrás: Soproni szemle XI. évfolyam 1957.1-2 szám)

A XVIII. században a belváros csapadékvizének elvezetésére falazott csatornát építettek ki és azt a toronyaljba süllyesztették le. A csatorna mintegy 4 méter mélységben, 1,5 méter szélességben törte át a valószínűleg egybefüggő alaptestet. (5.ábra) Ez volt az első olyan beavatkozás, mely megzavarta az évszázadok alatt beállt tartószerkezeti egyensúlyt. 1784-ben Kühnel Antal, Esterházy Miklós udvari építésze, tervet készített a toronysisak restaurálására. 1821-22-ben a Hátsókaput lebontották. 1893-ban a régi Városházát és ezzel egyidőben a tornyot keletről támasztó belső- és középső városfalat is elbontották. A bontásához Storno Miksa szerint dinamitot használtak. Az új Városháza építésének pinceszintjét körülbelül 2,5-3,0 méter mélyen kiemelték. Ennek köszönhetően a torony minden megtámasztását elvesztette keleti irányból, megszűnt a boltvállak vízszintes erőinek felvétele és megjelent az északi kapuív feletti repedés. A toronyaljat Kiss István és Schulek Frigyes szakvéleménye alapján kifalazták és csak kis átjárót hagytak, így kivédtek a torony összeomlását. A megrepedt boltozat alatt új boltozattal kiváltották a felülről érkező terheket. Az új Városháza pár év alatt elkészült, a torony állapota a kifalazással stabilizálódott.



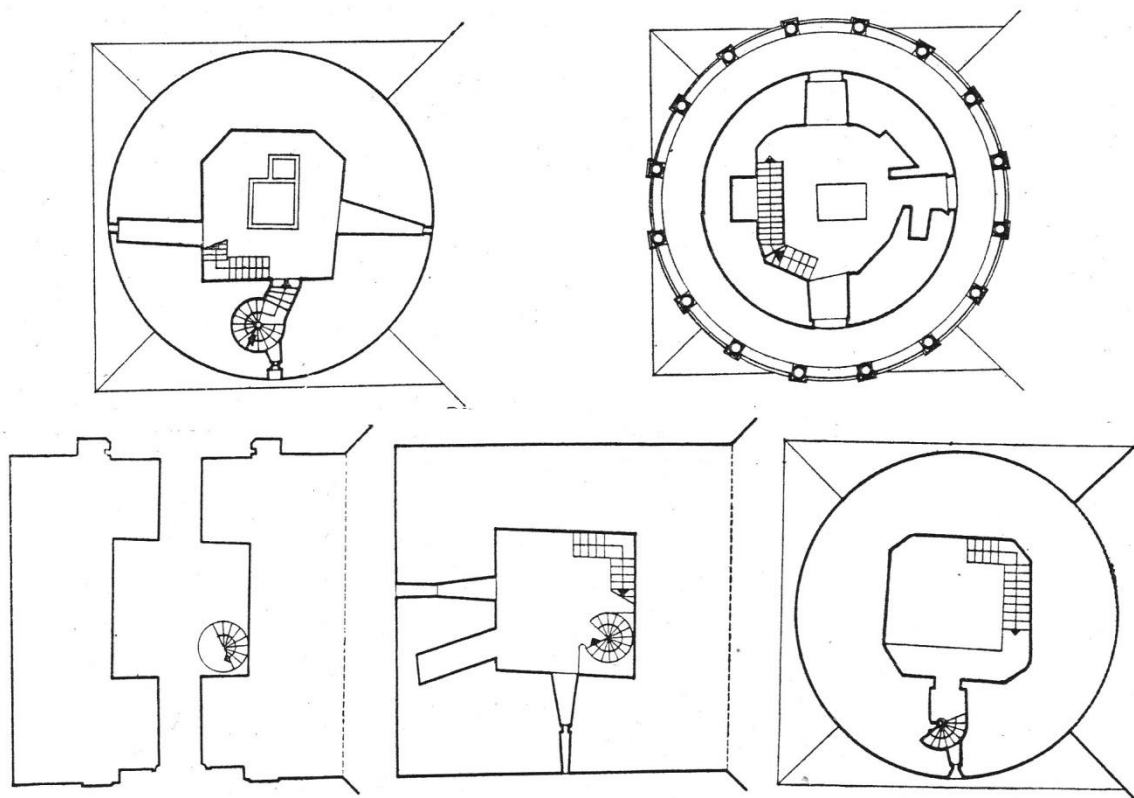
5. ábra A toronyaljba süllyesztett falazott csatorna metszete

1894. április 30-án M. Hintager bécsi építész szakvéleménye szerint a torony 18 cm-t dőlt. 1895. április 16-ai szakvélemény szerint, melyet Hegedűs Gyula a Sopron Megyei Állami Építészeti Hivatal főmérnöke készített, a loggia magasságában (23,85m) 14 cm hajlott ki az épület, fölötte függőleges. Ebből arra következtethetett, hogy az 1861-es magasítás óta dőlése nem változott.

1900-ban lebontották a kétemeletes Toronyőr házat a Stornóház és a Tűztorony mellől. Ezzel egyidőben elbontották a belső és középső városfalat és megszüntették a boltvállakban fellépő vízszintes erők megtámasztásait. A bontás után körülbelül 70 évig a torony nyugati oldala teljesen

szabadon állt. A felszabadult területen járműforgalom zajlott, még villamos is járt itt ezen időszakban.

1952-ben a Tűztoronyról felmérés készült. Ekkorra már a közlekedés az Őrház helyén zajlott. A toronyba a toronyaljából csigalépcsőn lehetett feljutni. (6. ábra)

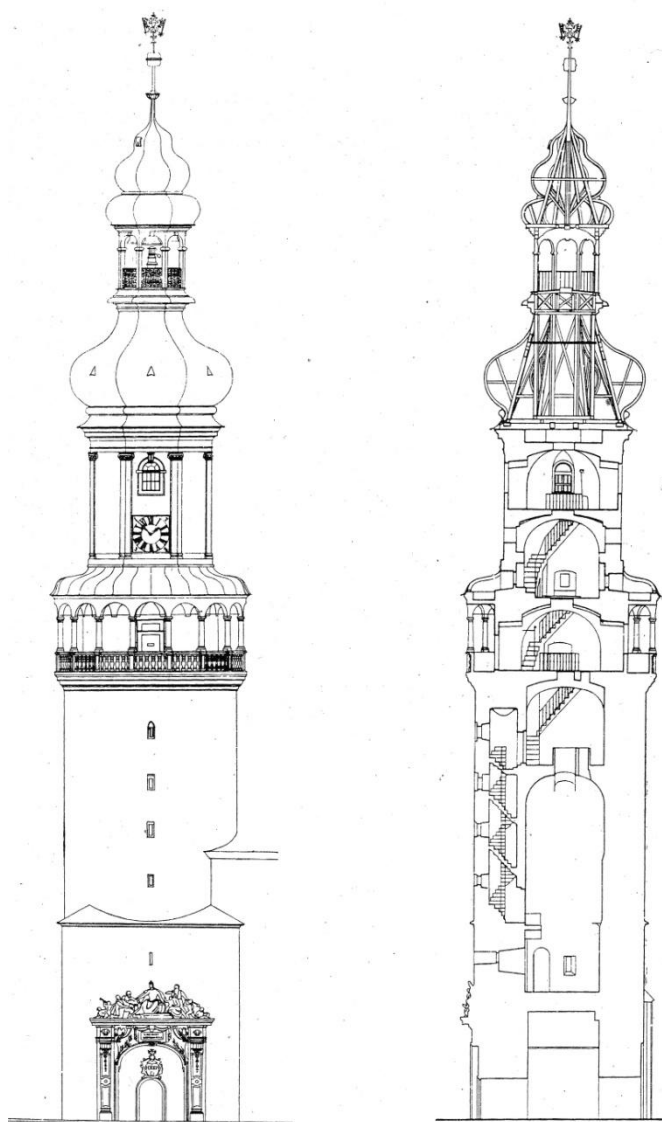


6. ábra A Tűztorony alsó négy szintjének alaprajza (1952.)

A toronyalj kibontására több szakvélemény készült, de egyik sem valósult meg. Az 1967-71 közötti műemlék-helyreállítás alatti műveletek és észrevételezések után az Őrház helyére vasbeton múzeumépület került. (építész: Nagypál Judit, statikus: Urbán István). 1971 júliusában a statikus a hengeres toronytest belső oldalán a jelentkező repedések összefogására vasbeton varratok beépítését rendelte el. A toronysisak észak-nyugati felfekvései alatt a boltozat megroppant. Ennek oka a szélteher miatti feszítőerők hatása, valamint a faszerkezetet is károsító beázások.

Jelenlegi állapotában a torony alsó része négyszögletesen épített. Az átjáró csak kis köríves ajtószzerű nyílás. A négyszögletes részből emelkedik ki a hengeres rész, melyen négy nyílás helyezkedik el a belváros felé. A többszörösen golyvázott párkány felett vonóvasas, kosárárvas loggia fut körbe toszkán oszlopokkal. A mellvéd kőbabás. A loggia feletti rövid réztető után nyolcszög alaprajzúvá válik a torony, melynek sarkain torzított jón felpillérek találhatók. A

többszörös párkány után az erőteljes hagyma formájú rézkupola nyitott lámpást tart, melynek köríveit befelé hajlított toszkán félpillérek tartják. (7. ábra)



7. ábra A Tűztorony homlokzata és metszete, 1952.

2.2.1. A toronysisak faszerkezetének jelenlegi állapota

A toronysisak tartószerkezeti elemei tölgyfából készültek, faszerkezeteit az 1800-as évek végén és az 1960-as években javították. A toronysisak felső zárt részében 1899-es dátum található, másik helyen Molnár Sándor 1969.VIII.11. felirat olvasható. Az sisak alsó részében a IV. főállását pallóval erősítették. Minden rész deszkaaljzatán vízlefolyás nyoma látható. A nappali és éjszakai hőmérsékletváltozás hatására a lehülő rézlemezen a belső levegő páratartalma lecsapódik. Nagy valószínűséggel a nedvességre utaló foltok a páralecsapódásból származnak. A történelem folyamán fémlemezfedések aljzatát úgy alakították ki, hogy a deszkák között körülbelül 1-2 cm-es réseket hagytak, hogy a lecsapódott nedvesség el tudjon párologni és ne károsítsa a faanyagot.

Összességében a faszerkezet anyaga viszonylag jó állapotban van. Ennek egyik oka, hogy a rézlemezzel borított zárt térben a belső hőmérséklet elérheti akár a 60-70 °C-ot is. A farontó gombák többsége ezen a hőmérsékleten 1-2 óra alatt elpusztul. A fakárosító rovarok 60 °C-on 30-50 perc alatt elpusztulnak. A soproni Tűztorony faszerkezetében fellelt károsítók a házi cincér, szíjácsbogár, vöröskorhadás. A toronysisak alsó részébe a IV. és V. főállás oszlópa jelentős rovarrágás miatt károsodott. Vöröskorhadás okozta károsodás figyelhető meg a talpszelemeneknél. A károsodás minden esetben korábbi eredetű, jelenleg aktív gombakárosító nem található a Tűztoronyban. (Faanyagvédelmi szakvélemény)

A torony jelenlegi állapotát a 2011 augusztusában készített fotók mutatják be a 8-13. ábrán és a 12-15 számú mellékletben.



8. ábra A toronyszerkezet belseje



9. ábra A toronyszerkezet ferde dúcai, síkban elhelyezett andráskereszt merevítéssel



10. ábra Talpszelemen lekötése



11. ábra A toronysisak alsó, középső része



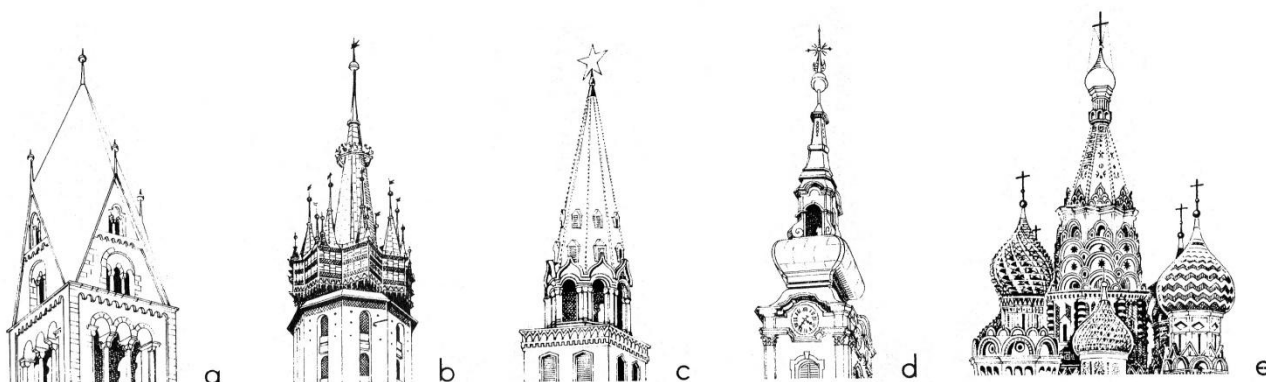
12. ábra A toronysisak felső zárt részének bejárata a nyitott teraszcól



13. ábra A toronysisak felső zárt részének ramonádja

2.3. Toronysisakok szerkezeti fejlődése

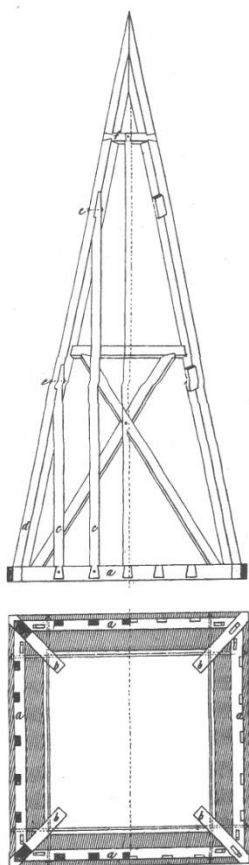
„A toronytető változatai: Az egyenes és íves tetőszakaszokból vagy azok együtteséből nagy formai változatossággal kialakított összetett, többszörösen összetett vagy különleges (pl. hagyma) alakú toronyfedelek.” (Gábor L. III., 1976.) Tehát, ahogy azt az előző fejezetben írtuk, a toronysisaknak elsősorban építészeti, ideológiai, csak másodsorban van funkcionális és szerkezeti szerepe. A torony alakját, formáját ideológiai szerepe és építészeti jelentősége határozta meg. (14. ábra)



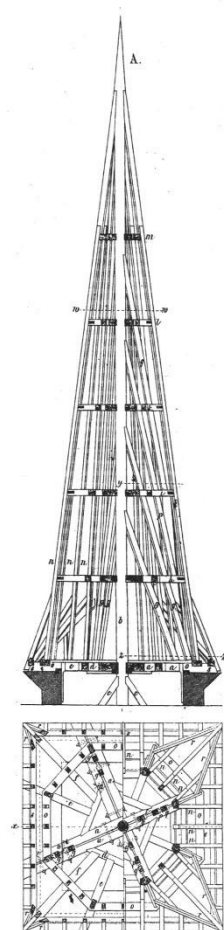
14. ábra Toronytető kialakítási változatai a) rombuszfedeles torony b)krakkói Fekete Mária templom tornya c) Kreml oldaltornya d) budapesti szent Anna templom tornya e) Vaszilij Blazsenyij székesegyház toronyegyüttese (forrás: Gábor III.)

A felnyúló és összetetté váló toronyszerkezet a XV. századra Európa-szerte megtalálta kiforrott formáját. Megjelent a dűltszékes toronyfedél. Ez eredetileg egy császárfára szerkesztett toronysisak, melynél az egész szerkezet egy függőleges tengelyre, a császárfára épül fel. A kőből vagy téglából épült torony tetején lévő sárgerendákra illesztették az egymást keresztező kötőgerendákat, és ezek metszéspontjára helyezték a függőleges császárfát. A torony tetősíkjaiban és annak sarkaiban kialakított szaruzat szintenként vízszintes kereteken támaszkodott, melyet ugyancsak szintenként torokgerendák vagy andráskeresztek merevítettek. A szerkezetet szintenként lehetett építeni és a császárfá kivételével nem kellett hozzá hosszabb gerenda, mint egy átlagos tetőszékhez. Hátránya volt, hogy a kész toronysisakba nehezen lehetett feljutni. Ezt az egyszerű szerkezetű (de nagyon faigényes) és átlagos tetőszéképítő tudással építhető szerkezetet a XVIII. század elejétől folyamatosan egyszerűsítették. Kezdetben egyszerűen elhagytak belőle részeket, így instabillá vált a szerkezet. A fatakarékosságnak köszönhetően végül viszonylag üres és egyszerű szerkezetet hoztak létre. Ezek átlagos esetben alsó, középső és felső keretből álltak, amit alul andrásozás merevített. (15. ábra) Ez a megoldás csak kisebb szerkezetek esetében volt alkalmazható. Nagyobb sisakok általában többszörözött sárgerendára ültek. Alapjuk egy merev alsó

tárcsa lett, melynek keretét erős, általában kettőzött Andrásskeresztekkel merevítettek. A sisakot több merevítőszinttel látták el, melyek az alsó tárcsát ismételték meg kisebb formában. Ezeket a felső tárcsákat kötötték össze a szaruzat elemei. A császárfa és a merevítések szintjeit a toronysisak sarkaiból kiinduló elemekkel támasztották meg. (16. ábra)



15. ábra Császárfás tetősisak a XVIII. században
(forrás: Déry)

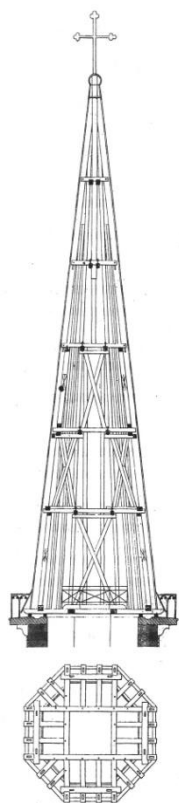


16. ábra Császárfás toronytető merevítőszintekkel
(forrás: Déry)

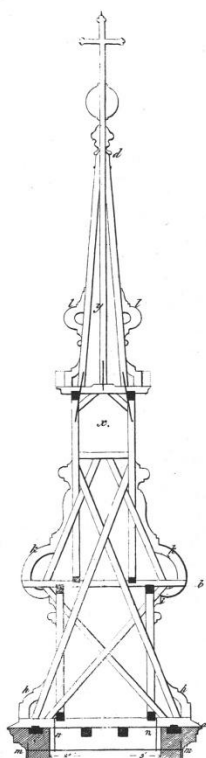
Az előző esetnél egyszerűbb szerkezet volt az úgynevezett Möller-rendszerű szerkezet, melyek nyolcszögletes alaprajzra szerveződő magas, karcsú szerkezetek. Az ilyen karcsú szerkezetek állékonyságát, merevségét nehéz lenne megbízhatóan császárfás szerkezettel megoldani. Az egyes fedélsíkokat körülbelül 4 méterenként beépített és gerendakoszorúkkal merevvé tett, tárcsaszzerű gerendarács támasztja ki, fedélsíkok merevségét pedig minden második mezőbe beépített andráskereszt biztosítja, míg a toronycsúcsot a legfelső gerendarácsról induló rövid császárfa viseli. Az András-kereszt merevítéseket a talp- és fejgerendákhoz csapolták. A talp- és fejgerendák a fiókszaruk szelemenjeiként is szolgáltak; a köztük lévő kötőgerendához illesztették őket, végeiket pedig az élszarukhoz lapolták. A Möller-toronytetők tiszta mérnöki szerkezetet mutatnak. Olcsó és stabil megoldás volt, mely a 19. század végére típusszerkezet lett. (17. ábra)

A XVIII-XIX. században sok átmeneti, „öszvér” szerkezet született. Ezeket gyakran dúcos toronyfedélnek nevezték, mivel dűltszékek helyett a császárfát dúccal rögzítették. A császárfát a kötőgerendákra állított dúcok tartják, feszítőműszerűen támasztják meg. A toronycsúcsot hosszú császárfá vagy dúcokkal függesztett rövid császárfá hordja. Az élszaruk a kötőgerendákon állnak, míg felső végükkel a császárfához csatlakoznak csapos kapcsolattal. A szarufák a kötőgerendákhoz csatlakozó fiókgerendákon állnak, felső végük az élszarukhoz csapoltak. A magasabb toronysisakok hosszú élszarui középen megtámasztást igényelnek, melyet vagy a császárfához csatlakozó torokgerendával oldottak meg, vagy fogópárral. Még magasabb és nagyobb méretű toronysisakoknál a szarufákat még derékszelemenekkel is erősíteni kellett. A derékszelemeneket a fogópárok felé helyezték, esetleg még dúcokkal fel is támasztották, melyeket a császárfának támasztottak. (Pattantyús-Ábrahám Ádám, 2011.)

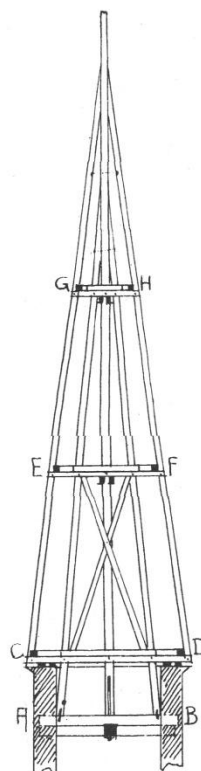
A hagyományos dűltszékes sisakokat Németországban és a Habsburg területeken felváltotta a Habsburg-hagymával díszített toronysisak. Ezt az íves és nagy kiterjedésű szerkesztett deszkaívekből készített gyűrűk tartották. Viszonylag hamar rájöhettek arra, hogy ezek a formák lehetővé teszik a torony karcsú formájához képest széles merevítések építését, mivel ez a forma helyenként kiszélesedik. Megjelentek e toronyszerkezetből kilépő vízszintes keretek, melyek a deszkaíveket fogták, és kiterjedésüknél fogva nagyobb stabilitást biztosítottak a sisaknak, mint a hagyományos szerkezetek. Általában két merev keretet helyeztek el egy toronysisakban, az egyik az alapsíkot alkotó tárcsa volt, a másik a hagyma magasságában volt kialakítva. Mivel a hagyma elég széles és nagy volt, így jelentős önsúllyal rendelkezett, aminek köszönhetően elhagyták a ferde sisakszakaszt és a két rácsos szerkezetű tárcsát egyenes oldalfalú sisakszakaszokká alakítottak. ez nem csak a stabilitást fokozta, hanem az építést is egyszerűbbé tette. A két tárcsa között rácsos falú, keresztmerevítéses dobozszerkezetet helyeztek el. A hagyma felett ezt a megoldást megismételték, majd a lezáró keretre építették rá a toronycsúcsot. A hagyma formáját deszkákból fűrészelték ki és átfogásos toldással több rétegből álló íveket alakítottak ki. Ezek a ramonádok a szarugerendákra szerkesztettek vagy közvetlenül a szelemenekre támaszkodnak. A hagyma vízszintes metszete lehet négyzet, nyolcszög vagy sarkain levágott négyzet. A barokk toronysisakok - miként a soproni Tűztorony is - tipikusan ilyen kialakítással készültek. (18. ábra)



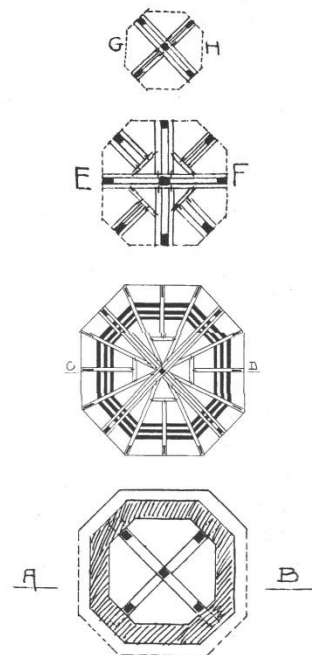
17. ábra Möller-típusú toronysisak (forrás: Déry)



18. ábra Barokk toronysisak (forrás: Déry)



19. ábra Torony tömbjéhez rögzített császárfa toronysisak (forrás: Déry)



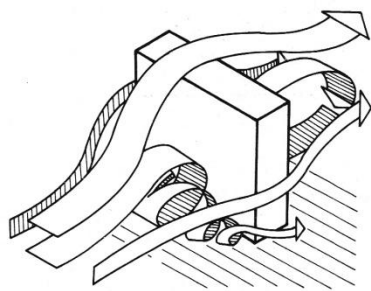
A XIX. század végén tovább egyszerűsödik a sisakszerkezet, mivel a csomóponti kapcsolatokhoz már fém elemeket használnak. Ennek köszönhetően lassan kikoptak a vízszintes merevítőkeretek, tárcsák, de megmaradt a császárfa és a függőleges András-kereszt merevítés. Ekkor a toronysisak szerkezetét már jobban rögzítik a torony alsó falazott szerkezetéhez, így a császárfa a toronyfalba befogott keresztmerevítésbe ül bele. (19. ábra) A XIX. században a hagymás toronyfedés sem ment ki a divatból. A toronytörzsbe levezetett és ahhoz rögzített magas, átlósan merevített császárfa gúlszerkezetre építették rá a toronyforma kiugró díszzeit, tagolásait. Ez a megoldás lehetőséget adott az óra elhelyezésének szabadabb formálására. (20. ábra)

A XIX. században már nagy járható toronysisakokat is építettek, általában középületekre. A torony végződésénél körben elhelyezkedő erkélyt alakítottak ki és a galériás kialakítású belső tér könnyen átlátható volt. Ezek a sisakok sokszög alaprajzúak voltak, hosszú szaruzattal, csonkafákkal megfogott merevítőrácsokkal. (21. ábra) Merevítő szerepe is volt a szintenként elhelyezett galériasornak. Ehhez egyszerűbb esetben a szaruzatot kettőzték, így értek el nagyobb stabilitást.

dúcaiként is működnek. A nagyobb biztonság kedvéért ezeket a dúcokat, saját síkjukban egymáshoz is merevítették András-keresztekkel. A nyolc oszlopot egymáshoz is merevítették, egyrészt két, nagyobb távolságot átfogó térbeli andrásozással, másrészt egy kisebb távon az oszlopok síkjában lévő andráskötésekkel. A felső kishagyma részen megjelenik a császárfás szerkezetekre jellemző kötőgerenda-kereszt és a középre állított császárfá, melyet nyolc dúc tart és feszít fel. A nyolc dúcból négy a kötőgerendákról indul, négy pedig a fiókgerendákról. A dúcokhoz csatlakoznak a felső kis hagymát alakító ramonádok. (Pattantyús-Ábrahám Ádám 2011.)

A helyszíni bejárás után, az általunk pontosított korábbi felmérések a dolgozat végén a 20.-22. mellékletben találhatóak. A Gábor László: Épületszerkezettan III. könyvben található rajzokat vettük alapul a helyszíni vizsgálatok során. Ezeket a rajzokat Bakondi János, nyugalmazott egyetemi docens készítette 1960 környékén.

3. A szél hatása az épületekre



22. ábra Épület körüli széláramok (forrás: Zuranski)

A szélteher a levegő áramlásának az adott épületre kifejtett hatásából származik. A szélteher függ a levegő sűrűségétől, szélsébségétől, az építmény környezetétől és a terepviszonyoktól, az építmény geometriájától, az építmény tartószerkezeti megoldásaitól és az építmény magasságától. A szélteher az épületre ható nyomáskülönbségekből és a felületen ható súrlódási erőkből áll. (22. ábra)

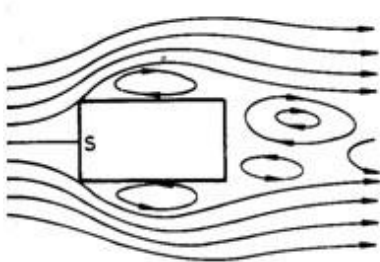
Az épület tartószerkezetét mindig úgy kell tervezni, hogy a különböző módokon kiszámított szélterhet el tudja viselni, nem csak az anyag teherbírása legyen kellő mértékű, de alakváltozási tönkremenetelt se szenvedjen a szerkezet. A szélteher számításánál figyelembe kell venni az építmény tervezett élettartamát, továbbá tekintettel kell lenni a szél átlagos sebességére és jellemző tulajdonságaira (turbulencia intenzitása, szomszédos épületek közötti interferencia), a tartószerkezet aerodinamikus tulajdonságaira és a szerkezet érzékenysége dinamikusan hatásokkal szemben. (Zuranski, 1986.)

3.1. Épület körüli áramlások

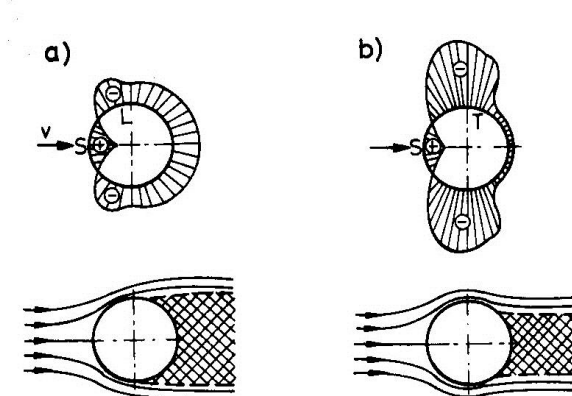
Az épületek körüli áramlásra jellemző, hogy a széltámadta oldalon az épületre magasság mentén növekvő szélnyomás hat, és az épület falainak és a tetőnek szél felőli élén határréteg-leválás keletkezik. Az épület előtt nyomás keletkezik és túlnyomási örvény alakul ki a talaj közelében, míg az épület mögött és az oldalfalain szélszívás keletkezik.

Azokat a testeket, ahol a határréteg leválás jelentősen befolyásolja a test körüli áramlást és így a testre ható erőt, tompa testnek nevezzük. Az áramvonalas testeknél nincs határréteg leválás, vagy annak alárendelt szerepe van. A tompatesteknél a nyomásmegoszlás, az áramvonalas testeknél alapvetően a fali csúsztatófeszültség okozza a testre ható ellenálláserőt. Egy adott test a megfűvás irányától függően lehet áramvonalas vagy tompa test. Tompa testek általában az épületek, tornyok, autók, míg a repülőgépek és a hajók vízbe merülő része áramvonalas test.

A test mögötti térrészben a test hatása befolyásolja az áramlást, ezt a részt nyomnak nevezzük. A nyom tartalmazza a leválási buborékot és azt az áramlás irányában növekvő keresztmetszeti térrészt, ahol a sebességek kisebbek és a turbulencia nagyobb, mint a zavartalan áramlási térben. A leválási buborék az áramlási tér határréteg leválás következtében létrejövő azon része, amelyet a leválás helyéhez csatlakozó nyíróréteg határol, és amelyben a főáramlás irányával ellentétes irányú visszaáramlás fontos szerepet játszik. Az áramlási sebességek ebben a térrészben a zavartalan áramlási sebességek közel tized-ötöd részét teszik ki. Ennek köszönhető, hogy a nyomás a leválási buborékban közel állandónak tekinthető. A leválási buborékban (recirkulációs zóna) kicsi az össznyomás és nagy a turbulenciafok, az áramlás instacionárius (23. ábra).



23. ábra. Test mögötti leválási buborék



24. ábra. Egy körhenger a) lamináris és b) turbulens körüláramlása

4. Aerodinamikai vizsgálatok szélcsatornában

A soproni Tűztorony hagyma-alakú toronysisakjának szélterhének megállapítására a szabvány csak durva közelítést tud adni. Ahhoz, hogy tudjuk, hogyan viselkedik a torony széláramban, vizsgálatokat végeztünk a BME Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratóriumának szélcsatornájában, később ezeket a mérési eredményeket felhasználtuk a torony statikai méretezésénél.

A szélcsatornában nem modelleztük az atmoszferikus határréteget, mivel jó biztonsággal a légköri határréteg a toronysisak magasságában közel azonosnak vehető. (Később a statikai számításoknál már az Eurocode-ban meghatározott terepszint feletti magasságtól és a beépítési viszonyoktól függő torlónyomás (q_z) értékeivel szoroztuk a nyomástényezőket.) A mérések során meghatároztuk a torony alapjánál ható vízszintes irányú erőkomponenst két széliránynál. A vizsgálatoknál külön méréseket végeztünk abban az esetben is, hogy ha a felső nyitott rész be van borítva. A mérések második részében a felületi nyomáseloszlás meghatározása céljából a modellszimmetriát kihasználva 15-16 mérési pontban (attól függően, hogy beborítottuk-e a felső nyitott részt vagy sem) nyomásméréseket végeztünk.

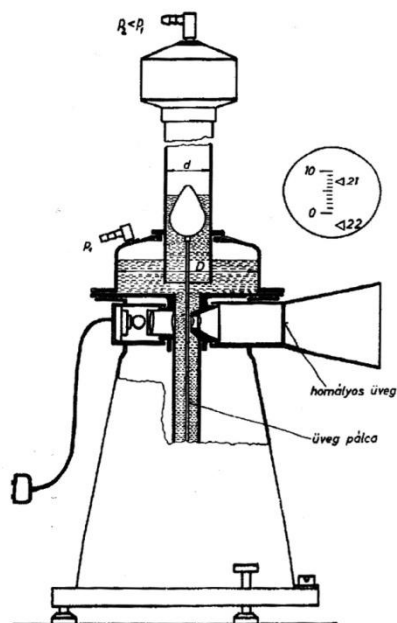
4.1. Áramlástan (fogalmak)

Jelen fejezet a mérések kiértékelése során alkalmazott kifejezéseket, fogalmakat ismerteti.

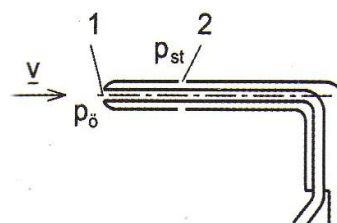
Ha egy adott nyomású közeg adott sebességgel áramlik, és az áramló közegbe egy szilárd testet helyezünk, akkor a testen találunk olyan pontot, ahol az áramló levegő sebessége lecsökken zérusra. Ezt a pontot *torlópontnak* nevezzük és az itt mért nyomást *torlónyomásnak* vagy *össznyomásnak* nevezzük. Az össznyomás a megállított közeg nyomása. A vizsgált test előtt kellő távolságban (a test áramlásra merőleges méretének 10-20szorosában) mért szélnyomás a *statikus nyomás*. Itt a test előrehatása már elhanyagolható. A szélcsatorna vizsgálatoknál a toronymakett felületén elhelyezett méréspontokon *dinamikus nyomást* mértünk, ami az össznyomás (torlónyomás) és a statikus nyomás különbségéből adódik.

A különböző nyomásmérő műszerek közül, a folyadékoszlop-kitérés meghatározásán alapuló Betz-mikromanométert (25. ábra) használtuk a belső sebesség meghatározására. Ezzel a műszerrel közvetlenül a nyomáskülönbséget mérhetjük. A később tárgyalt Prandtl-csővel együtt alkalmaztuk. A Betz-mikromanométerben két koncentrikusan elhelyezkedő folyadékoszlop van. A középső folyadékoszlop a nyomáskülönbség hatására felemelkedik. A víz felszínén egy üveg buborék lebeg, amihez egy vízoszlop-milliméter (9,81 Pa) osztásokat és számokat tartalmazó

üvegpálca van erősítve. Az üvegpálcán lévő osztásokat egy villanyégő és egy optika az opálüvegre vetíti, amelyen újabb 10 osztás van. A két osztássor segítségével 0,1 vízszlopmmilliméter (0,981 Pa) pontossággal lehet mérni.



25. ábra Betz-mikromanométer (forrás: Lajos)



26. ábra Prandtl-cső (forrás: Lajos)

A szélcsatornában aktuálisan jelenlevő szél sebességét a mérőtérben elhelyezett *Prandtl-cső* (26. ábra) segítségével mértük. Ez a mérőeszköz a dinamikus nyomást méri, melynek segítségével meghatározhatjuk a sebességet az alábbi módon:

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}$$

Az összefüggésben v [m/s] a szélesebesség, ρ [kg/m³] a levegő sűrűsége amit a $\rho = \frac{p}{RT}$

összefüggéssel számolhatunk, amelyben p [Pa] az atmoszférikus nyomás, T [K] a levegő hőmérséklete és $R = 287$ [J/kg K] a levegő gázállandója. A Prandtl-cső két koncentrikusan elhelyezkedő csőből áll. Az áramlással szemben elhelyezkedő belső cső az össznyomást vezeti ki, míg a belső csövet körülvevő külső cső falán a statikus nyomást kivezető furatok találhatók. Ezek a furatok a cső orrától meghatározott távolságban helyezkednek el, ahol az áramvonalak jó közelítéssel párhuzamosan futó egyenesek. Ily módon könnyen belátható, hogy a két cső közötti térben statikus nyomást mérhetünk. Ha a Prandtl-cső két kivezetését (statikus nyomás és össznyomás) egy mikromanométerhez kötjük, akkor az nyomáskülönbséget, vagyis a dinamikus nyomást fogja mérni. Ebből a dinamikus nyomásból és az ismert ρ sűrűségből kiszámíthatjuk az

áramló levegő sebességét. A Prandtl-cső viszonylag irányérzékeny. Ha az áramlási irány és a cső tengelye által bezárt szög kisebb, mint 15° , akkor nem csökken a mért dinamikus nyomás, de még 30° -os eltérésig körülbelül a valóságosnál 5%-kal mérünk kisebb sebességet.

A szélcsatorna-vizsgálatok során kapott értékekből a test felületén keletkező nyomásra jellemző c_p nyomástényezőt határoztuk meg. A számítási képleteket a következő fejezetben ismertetjük. A nyomástényező maximális értékét a torlópontban veszi fel ($c_{p\max}=1$), míg legkisebb értéke szokásos körülmények között $c_{p\min}=-3$ körül lehet. (Lajos Tamás, 2008.)

Az erőméréseknél mért értékekből a teljes szerkezetre ható szélró nagyságából *erőtényezőt* számoltunk. Az *erőtényező* a teljes testre jellemző alaki tényező, melyet megkaphatunk a nyomástényezők arányos összegzéséből is.

A *Reynolds-szám* az áramlástanban használt hasonlósági dimenziómentes érték. Ha egy épületet, járművet akarunk vizsgálni, akkor lehetőségünk van az eredetihez hasonló körülmények között, a valóságostól kisebb modellt vizsgálni. Ilyenkor a szélcsatorna vizsgálatoknál a hasonlósági törvényeket kell követni. Mindenekelőtt biztosítani kell a geometriai hasonlóságot, beleértve a felületi érdesség arányait is. Másrészt biztosítani kell, hogy a tehetetlenségi erők és a közeg belső súrlódási erői között az arány a két rendszerben azonos legyen. Erre szolgál a Reynolds-szám, melyet Osborne Reynolds (1842–1912) angol fizikusról neveztek el. A Reynolds-szám dimenzió nélküli mennyiség, mely a tehetetlenségi erők és a viszkózus erők, vagyis a közeg belső súrlódása közötti viszonyszám, és az alábbi képlettel számítható:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu},$$

ahol v az áramlási sebesség [m/s], l egy jellemző hossz méret, a Tűztoronynál ez a legnagyobb átmérő [m], ν a levegő kinematikai viszkozitása [m²/s].

4.2. Szélcsatornában végzett mérések

4.2.1. A szélcsatornában létrehozott áramlás

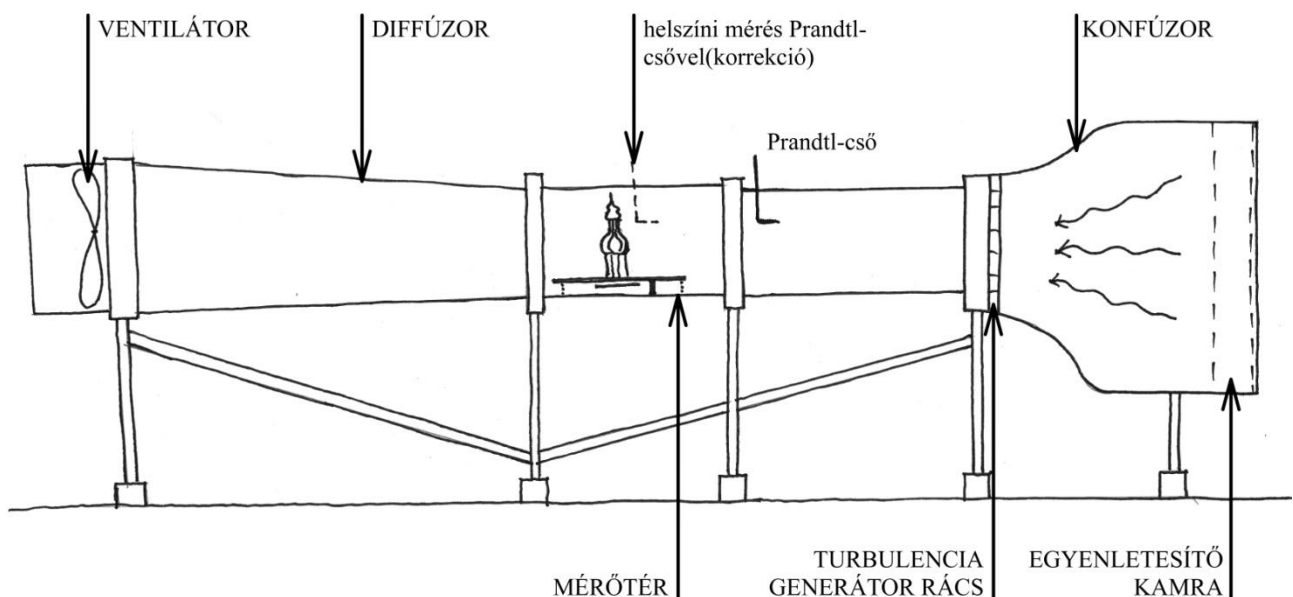
A BME Áramlástan Tanszékén a Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratóriumának nyitott áramú, szívott üzemű, zárt, 500x500 mm négyzetkeresztmetszet mérőterű szélcsatornájában végeztük a méréseket. (27. ábra) A jobb oldalon található csillapító kamrába lép be a labor levegője, majd az ehhez csatlakozó konfúzorban felgyorsul és az üveglakkal ellátott mérőtéren keresztül

átáramlik. Ezután a diffúzorban lelassul és a képen bal oldalt elhelyezkedő, áramlást létrehozó ventilátorhoz jut, majd innen továbbjut a laboratórium légterébe (28. ábra). A mérőteret három oldalról üvegezett lapok határolják, a negyedik oldalát alulról falemez burkolja.



27. ábra Nyitott áramú, szívott üzemű, zárt mérőterű szélcsatorna (BME, Áramlástan Tanszék, Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratórium)

Az ilyen szélcsatornának nagy előnye az egyszerűsége, viszont hátránya, hogy a ventilátorból kilépő levegő a laboratórium levegőjén keresztül a beszívónyíláson át visszajut szélcsatornába. Ez egyes esetekben nem kielégítően egyenletes sebességmegoszlást és alacsony frekvenciájú zavarást is generálhat a mérőterben. Ezen okból bekövetkező mérési hiba elkerülésének céljára szolgál a csillapító kamra. A szélcsatornában maximálisan 15 m/s sebességet tudunk létrehozni a mérőterben.



28. ábra Szélcsatorna rajza és működési elemei

A modellkísérlet végzése során olyan áramlásokat kell létrehozni, ami a valósággal megegyezik, vagy jó közelítéssel azonosnak tekinthető. A méréseknél nem modelleztük az atmoszferikus határréteget, hanem turbulens, de egyenletes sebességprofilt modelleztünk a nyomásméréseknél. Az erőméréseknél külön vizsgáltuk az örvény nélküli, egyenletes, lamináris áramlás esetét is. A turbulens áramokat a szélcsatornában elhelyezett turbulenciagenerátor-rács segítségével hozzuk létre.

A mérések során a referenciasebesség rögzítésére a toronymodell előtt elhelyezett Prandtl-cső szolgált. Mivel a beépített cső nem közvetlenül a modell előtt helyezkedett el, így a méréseket korrigálva közvetlenül a torony előtt is megmértük a dinamikus nyomást, majd a beépített cső által kapott értékeket egy megfelelő arányszámmal (65/61) felszoroztuk. Erre azért volt szükség, mert a széláram nem gyorsul fel a beépített Prandtl-csőig arra az értékre, mint aminek a szélcsatornában hátrébb elhelyezkedő toronymakett ki van téve.

4.2.2. A modell

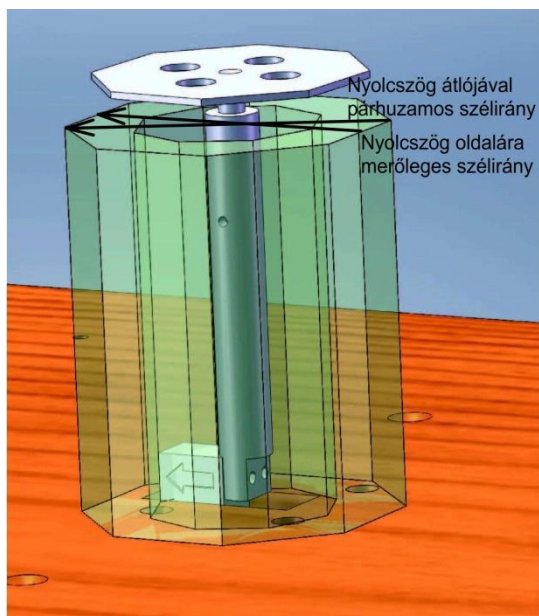
A mérés során a soproni Tűztorony toronysisakjának és a közvetlen alatta elhelyezkedő nyolcszögletű hengertest általunk előre elkészített 1:75 makettjét használtuk. A makett függőleges vetületének területe maximálisan a szélcsatorna keresztmetszetének 10%-a lehet, hogy pontos méréseket kapjunk. Ezért lett a makett mérete a fent említett arányszám. A modell tartalmazza a nagyobb geometriai elemeket, az apróbb elemek (korlátok, harangok, pontos tagozatok) hatását elhanyagoltuk, a tagozatok sematikusán készültek el (29. ábra). A modell felülete balsafa és sörkarton, érdessége elhanyagolható.



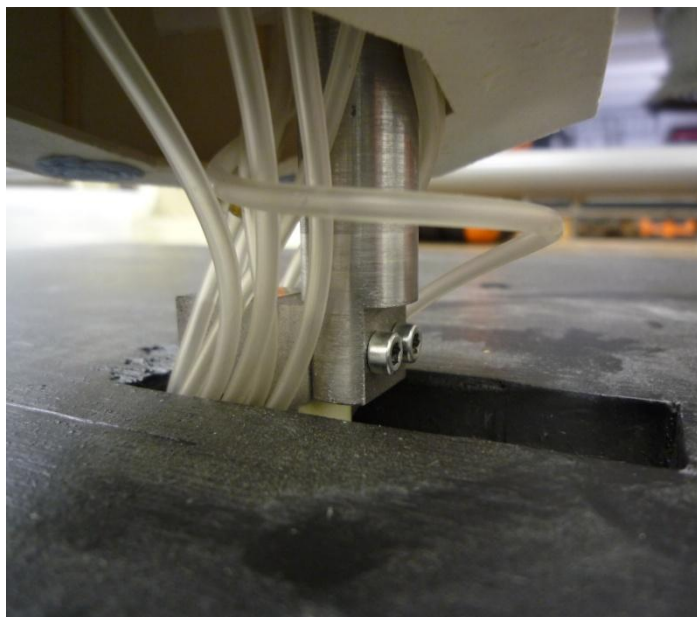
29. ábra Az 1:75-ös makett fotói: a) toronymakett teljes magasságában, b) a toronysisak közeli fotója

4.2.3. Méréstechnika

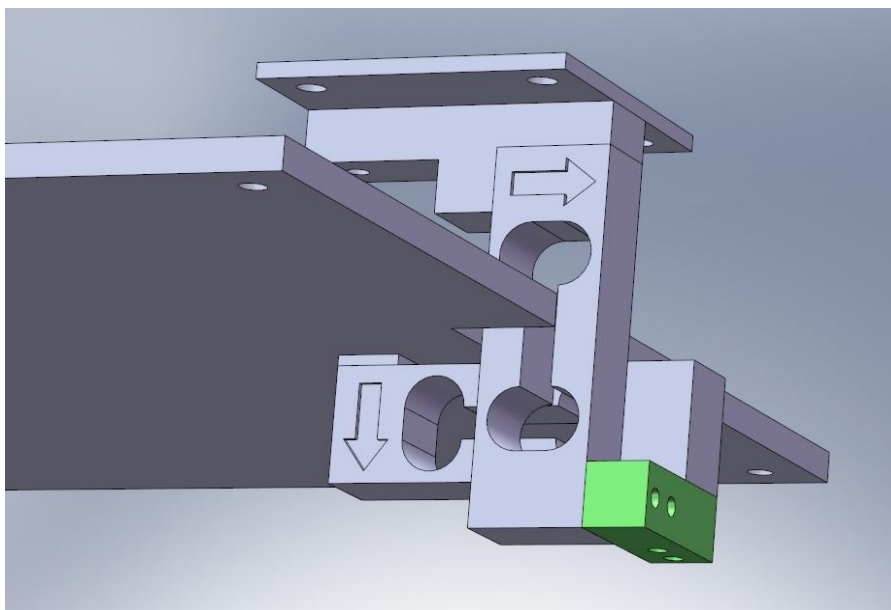
Az erőmérésnél a modell a szélcsatornába behelyezett platform felületébe süllyesztett kétkomponensű mérlegcellához lett rögzítve (30. ábra). A rétegelt lemez síklap alá szerkesztett erőmérő platform alaplemeze 3 csavar segítségével szintezhető, illetve emelhető és süllyeszthető, hogy a toronysisak és az alatta lévő nyolcszögletű toronyrész közötti távolság minimális legyen. Továbbá a torony magassága a függőleges fém rúd és cső segítségével csavarozással tovább állítható. A toronymakettbe előre elhelyeztük a nyomásméréshez szükséges mérőpontokat, a gumicsöveket olyan rövidre kellett vágni, hogy azok ne érjenek le az asztallaphoz, mert az befolyásolta volna az erőmérés pontosságát. Később a nyomásméréshez ezeket a csöveket ki kellett vezetni a mérőtérből, ezért réz toldóelemekkel gumicsöveket toldottunk hozzájuk. Mivel a rétegelt lemez síklap lábakon állt, a cellákat ki kellett takarni az áramlási térben, hogy a mért eredményeket ne módosíthassa a cellákra esetlegesen ható széláram. A mérlegcella felső felületén lévő tányérra rögzítettük a toronysisak alsó sörkarton lapját. A cella digitális interfészen kommunikál a mérőszámítógéppel. Az erőmérőről készített fotókat mutatják a 31.-34. ábrák.



30. ábra Kétkomponensű erőmérő Solid Works modellje



31. ábra Kétkomponensű erőmérő fotója a makettel



32. ábra A két cella rögzítése a platform alaplemezen



33. ábra Az erőmérő felső, állítható része a toronysisakhoz ragasztva



34. ábra Tűztorony makettje a kétkomponensű erőmérő platformmal

Az erőmérésnél nyolc esetet vizsgáltunk:

1. A megfűvás nyolcszög oldalára merőlegesen, nyitottan maradt a felső teraszrész (36. ábra), az áramlás lamináris.
2. A megfűvás nyolcszög oldalára merőlegesen, nyitottan maradt a felső teraszrész, az áramlás turbulens.
3. A megfűvás nyolcszög oldalára merőlegesen, de a felső nyitott részt beborítottuk (35. ábra), az áramlás turbulens.
4. A megfűvás nyolcszög oldalára merőlegesen, de a felső nyitott részt beborítottuk, az áramlás lamináris.
5. A megfűvás nyolcszög átlójának irányában, nyitva maradt a felső teraszrész, az áramlás turbulens.
6. A megfűvás nyolcszög átlójának irányában, nyitva maradt a felső teraszrész, az áramlás lamináris.
7. A megfűvás nyolcszög átlójának irányában, de a felső nyitott részt beborítottuk, az áramlás turbulens.
8. A megfűvás nyolcszög átlójának irányában, de a felső nyitott részt beborítottuk, az áramlás lamináris.



35. ábra Makett borított esetben



36. ábra A felső nyitott rész

Nyomásmérésnél a modell felületébe 15+1 db nyomásmérő furatot helyeztünk el (37. ábra). Minden egyes furatnál külön mértük a nyomást. Összesen három esetet vizsgáltunk. Mindhárom esetben a modell szimmetriáját kihasználva, a tornyot 0-180°-ig 22,5°-onként elforgatva mértük. Így egy-egy széliránynál a torony minden oldalán megkaptuk a kívánt nyomásértékeket.

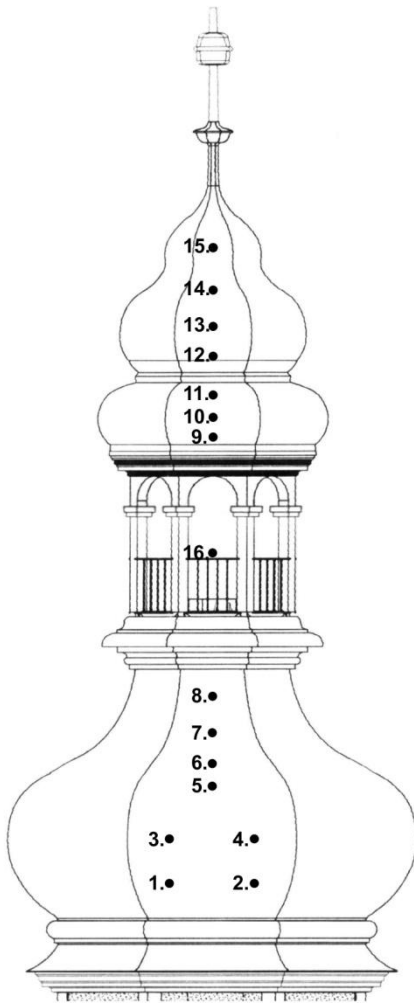
A három eset:

1. megfúvás nyolcszög oldalára merőlegesen, nyitottan maradt a felső teraszrész
2. megfúvás nyolcszög oldalára merőlegesen, de a felső nyitott részt beborítottuk
3. megfúvás nyolcszög átlójának irányában, nyitva maradt a felső teraszrész.

Mind a három esetben turbulens volt az áramlás.

A nyomásméréshez Setra 239 típusú piezorezisztív nyomástávadókat használtunk, melyeknek méréshatára 0-1200 Pa (a Prandtl csőre kötött távadó esetén) illetve +/- 650 Pa a modell felületére kötött csövek esetén. A nyomástávadót Betz típusú mikromanométerhez kalibráltuk. A mérési adatgyűjtéshez National Instruments NI PCI 6036 mérőkártyát használtunk. A szenzorok analóg jelét számítógépen dolgoztuk fel az Áramlástan Tanszéken írt Pressure&Force 3.11 verziójú Labview mérőprogram segítségével (39. és 40. ábra). A furatokba egyenként 0,8 mm átmérőjű 5-10 mm hosszú réz csöveket helyeztünk el, majd ezekre körülbelül 1 m hosszú gumicsövet húztunk. Ezeket a csöveket a mérőtér alsó falemezén lévő furaton kiveztük és a mérőpontokon lévő dinamikus nyomást egyesével lemértük (38. ábra).

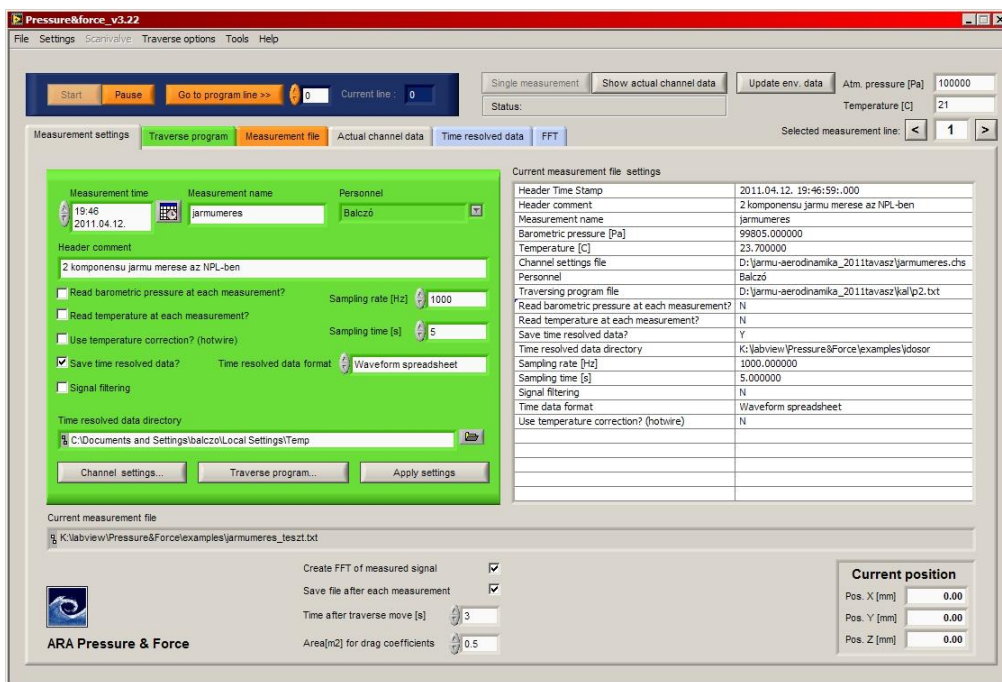
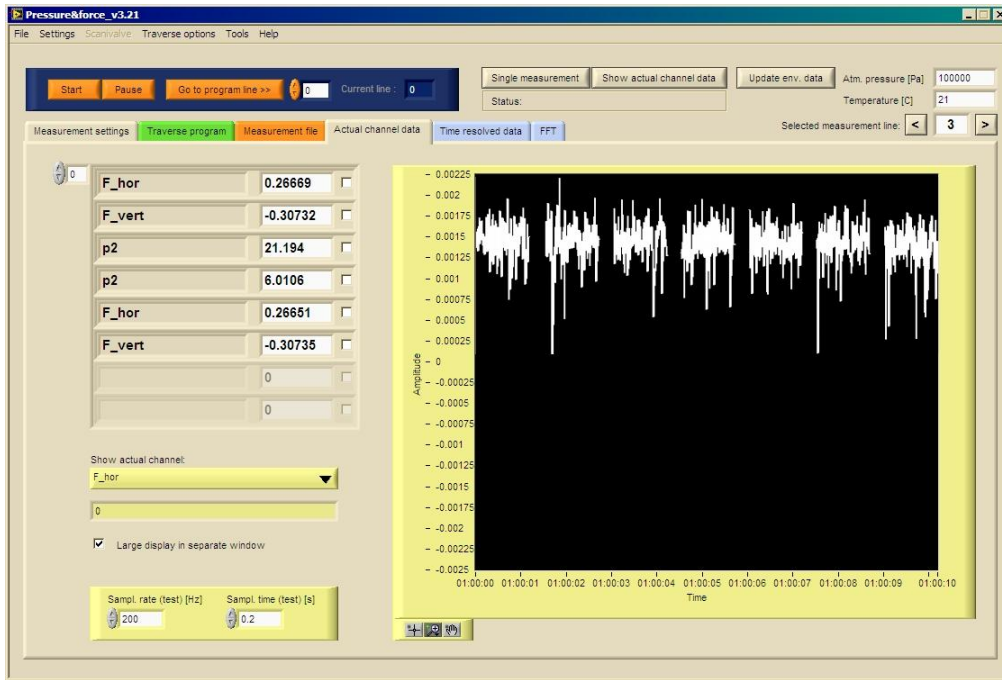
Az általunk használt szélcsatornában depresszió van, így a maketten olyan helyeken is szélszívást kaptunk, ahol alapvetően nyomást kellett volna mérni. Ezért a felületen ébredő nyomásokat korrigálni kellett, a szélcsatornával egy légtérben elhelyezett Prandtl-cső segítségével statikus nyomást mértünk, majd ezzel korrigáltuk a közvetlenül mért adatokat.



37. ábra Nyomásmérő furatok helye a maketten



38. ábra Nyomásmérésre előkészített modell a szélcsatornában



39., 40. ábra
Pressure&Force
Labview
mérőprogram
grafikus felülete

4.2.4. Mérési eredmények

Az erőmérésnél a fent említett 8 esetben 9 különböző sebességen (3-14 m/s) mértük a torony aljában ébredő, széliránnyal párhuzamos vízszintes erőkomponenst. Minden szélesebességnél 10s-os mintavételi időtartam alatt mért értékek átlagát jegyeztük fel. Egy-egy mérés során az erőmérésből, valamint a szélcsatorna mérőtér elején a turbulencia generátor rács után elhelyezett Prandtl-cső segítségével végzett dinamikus nyomásmérésből az erőtényezők a következőképpen adódnak:

$$c_f = \frac{F}{p_{din,Pr} \cdot A_{ref}}$$

, ahol A_{ref} a toronysisak függőleges síkra vetített felülete, F az vizsgálat során a torony alján a széliránnyal párhuzamos vízszintes erőkomponens. A $p_{din} = \frac{\rho}{2} v^2$ a Prandtl-csővön mért dinamikus nyomás. Az összefüggésben v [m/s] a szélesebesség, ρ [kg/m³] a levegő sűrűsége amit a $\rho = \frac{p}{R T}$ összefüggéssel számolhatunk, amelyben p [Pa] az atmoszférikus nyomás, T [K] a levegő hőmérséklete és $R = 287$ [J/kg K] a levegő gázállandója.

Amennyiben a szerkezetre ható valóságos erőket akarjuk meghatározni, ezt a Prandtl-csővel mért sebesség és a torony helyén referenciamagasságban ható sebesség összefüggésének felhasználásával tehetjük. A szélterhet a csúcshélesebességből számító Eurocode alkalmazása esetén - bizonyos típusú szerkezetek esetén - a nyomáseloszlás ismeretében számíthatók a szabályzatban értelmezett A_{ref} referenciafelületre ható kvázi-statikus erők. Az Eurocode a felületre merőleges koncentrált eredő erőt az

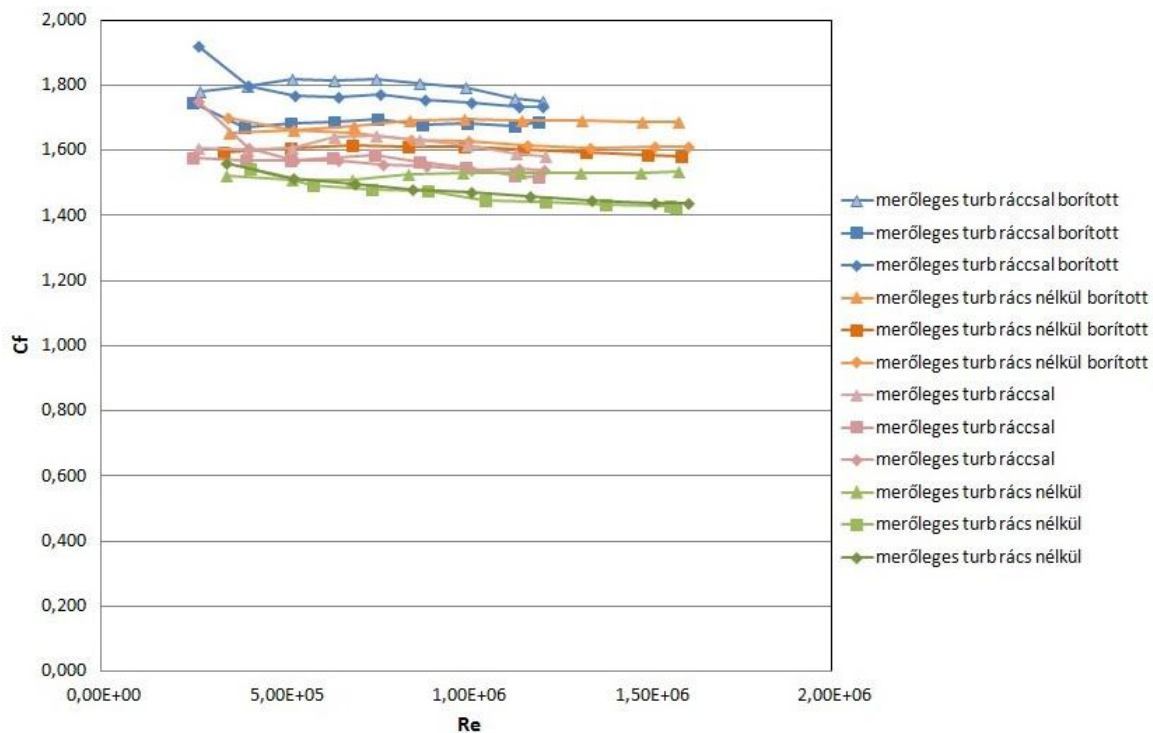
$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

összefüggésből számítja. Itt c_f az erőtényező, $q_p(z_e) = q_b \cdot c_e(z_e)$, ahol a z_e referenciamagasságban számított csúcstorlónyomás, a $c_s c_d$ pedig a szabályzatban értelmezett szerkezeti tényező.

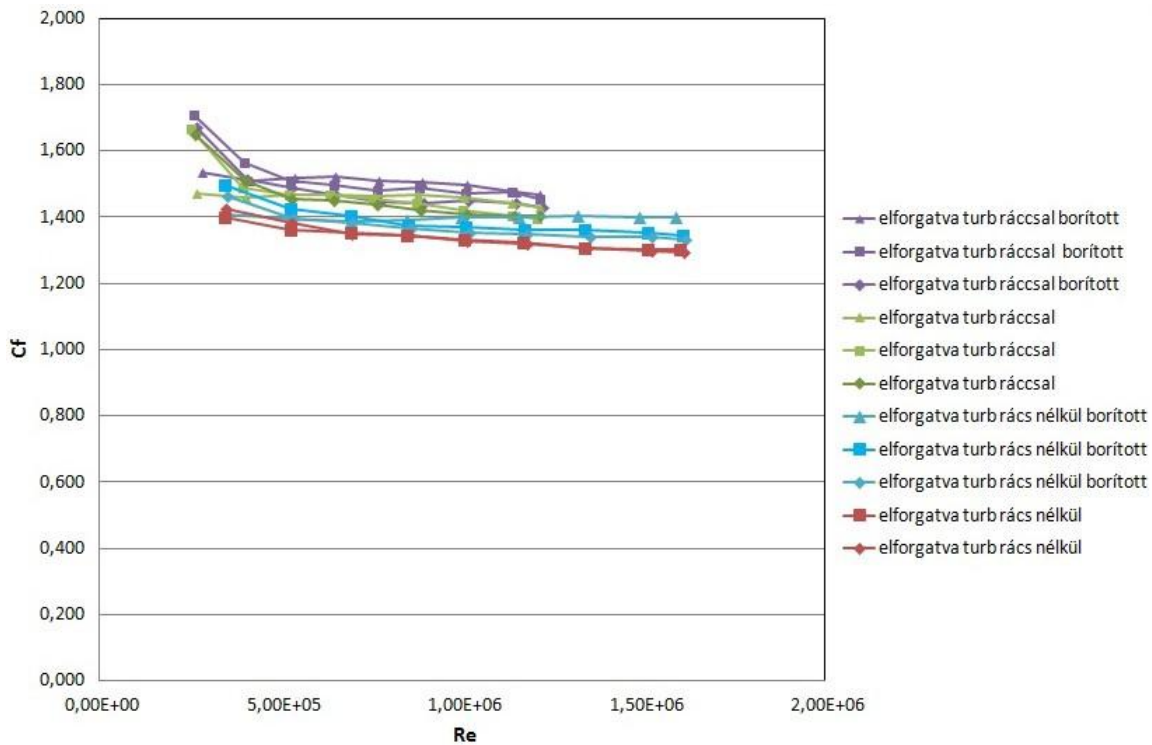
Élekkkel rendelkező testek esetén az áramlás kis Reynolds-számok felett az Re értékétől gyakorlatilag nem függ. Az erőtényezők sebességtől függetlennek tekinthetők, mint ahogy azt a 41. és 42. ábrán is láthatjuk, közel vízszintes vonalakat kaptunk.

Elmondható, hogy a nyolcszög átlójának irányában történő megfúvás esetében kisebb c_f erőtényezőket kaptunk, mint a nyolcszög oldalára merőleges megfúvás eseteiben. Ez annak

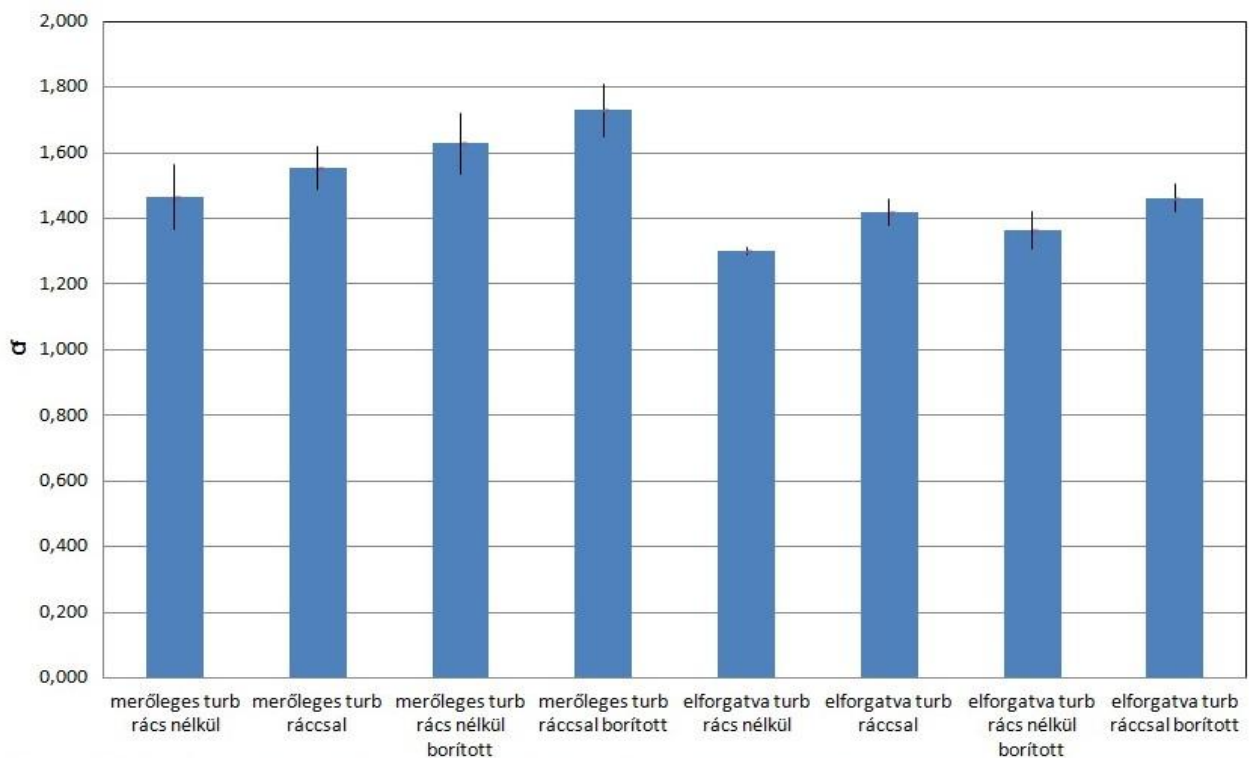
köszönhető, hogy a torony az első esetben áramvonalasabb, kisebb az ellenállása, mint a második esetben. Továbbá jól látható még a 43. ábrán, hogy ha az áramlás turbulens, akkor szintén nagyobb erőtenyezők jöttek ki a számításból, mint turbulencia rács nélkül, lamináris áramlás esetén. Amikor a modell felső nyitott részét beborítottuk, akkor a várakozásoknak megfelelően, nagyobb erőtenyezőt kaptunk, mintha nem lenne beborítva az a térrész. Tehát a „burkolat” növeli az ellenállástényezőt.



41. ábra Erőmérésből számított erőtenyezők a Reynolds-szám függvényében a nyolcszög oldalára merőleges megfúvás eseteiben



42. ábra Erőmérésből számított erőtenyező a Reynolds-szám függvényében a nyolcszög átlójának irányában történő megfúvás eseteiben



43. ábra Erőtenyező átlagértékei és a hibasávok a nyolc különböző esetben

A 43.-es ábrán található diagramokon az egyes mérési esetekhez tartozó hibasávok találhatóak. A különböző esetekben mért 3-3 mérés 3-3 utolsó c_f értékéből átlagot számoltunk, majd ugyanezekből az értékekből szórást is számoltunk. A hibasáv minimális és maximális értéke az átlagtól való eltérés megengedett mértékét mutatja ($2 \cdot \text{szórás}$). A különböző mérési esetekben mért értékek a hibasávon belül maradnak.

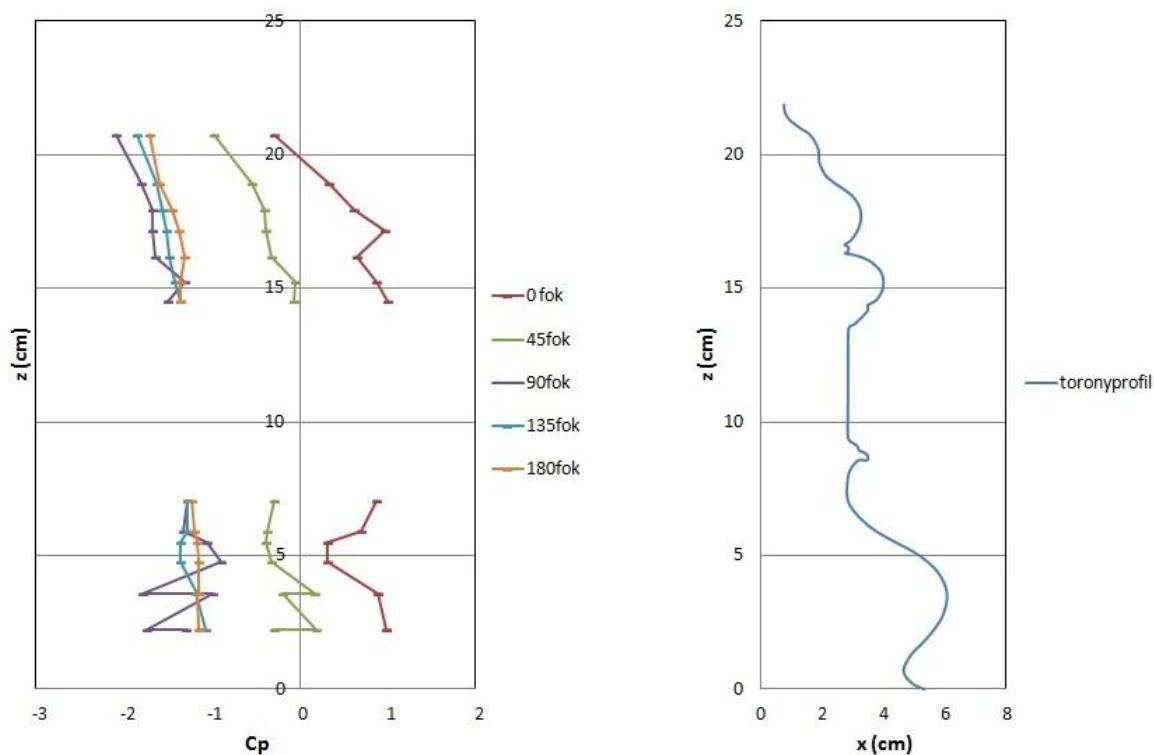
Az erőmérések kiegészítésére *nyomásméréseket* is végeztünk, melyek nemcsak a szerkezetet terhelő átlagos / statikus terhelésről, hanem a szélteher dinamikus komponenséről is információkat adhat. A második esetet nem vizsgáltuk. A nyomásméréseket 14m/s szélességnél végeztük, mivel a korábbi erőmérések alapján az eredmények ebben a tartományban Reynolds-számtól függetlennek tekinthetők. A mintavételi időtartam: 8s.

A nyomásmérésekből lokális nyomástényezőket számítottunk az alábbi képletek alapján:

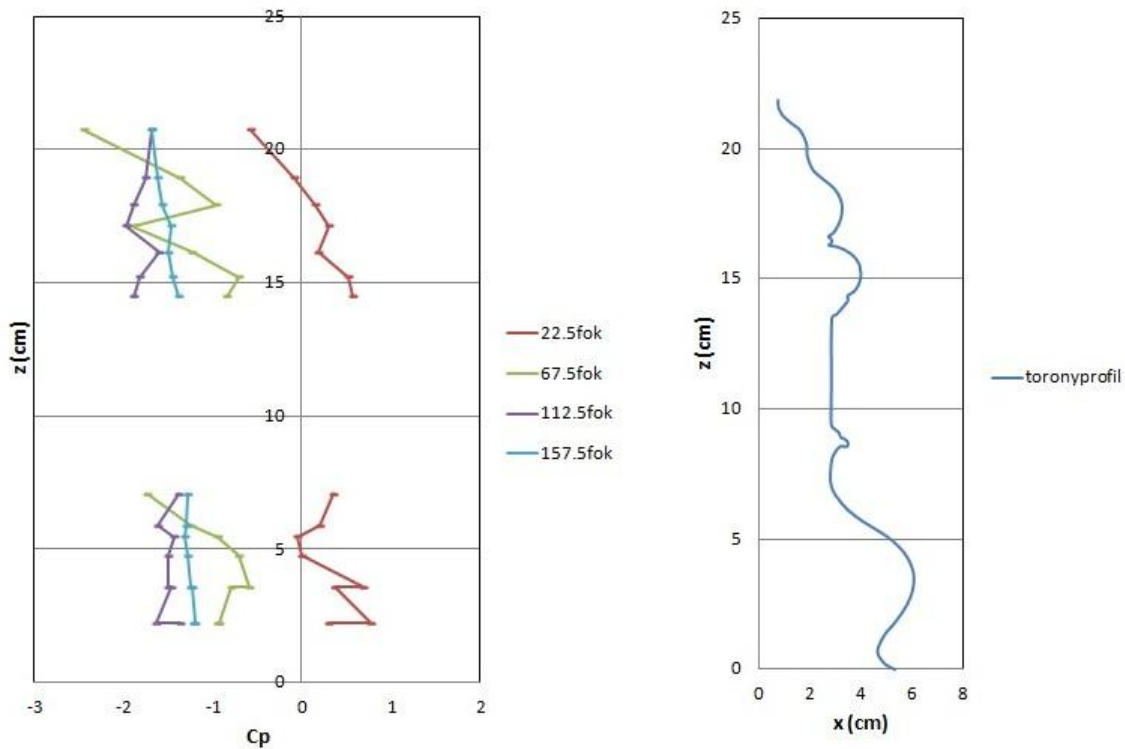
$$c_p = \Delta p / \Delta p_{\text{Prandtl}}$$

, ahol Δp a pontokon mért dinamikus nyomás, $\Delta p_{\text{Prandtl}}$ a Prandtl-csőn mért korrigált dinamikus nyomás és c_p az adott mérési pontokra jellemző nyomástényező. A számított nyomástényezőket a 44., 45., 46. ábrákon található diagramokon ábrázoltuk a magasság függvényében a 3 különböző vizsgált esetben. A nyolcszög oldalai a széliránnyal szöget zárnak be, ennek megfelelően a különböző oldalakon mért eredményeket külön adatsor jelöli. Az adatsorokat minden esetben a nyolcszögoldalnak a széliránnyal bezárt szögéről neveztük el. Jól látható, hogy szélnyomás (0-tól nagyobb érték) a 0° , $22,5^\circ$ -os oldalakon tapasztalható, míg már a 45° -os oldalnál megfigyelhető szélszívás. Az alsó két síkban oldalanként 2-2 mérőpontot helyeztünk el a modellen, így nyolcszög oldalára merőleges megfűvás esetén (44. ábra) a 45° -os és a 90° -os esetben „cikázás” figyelhető meg. Ez azt jelenti, hogy a 45° -os esetben egy oldalon belül a szélnyomás mellett megjelenik a szélszívás is, míg a 90° -os esetben egy oldalon belül eltérő a szélszívás mértéke. A 135° -os és a 180° -os esetben pedig az adatsorok közel egy egyenesbe esnek, mely arra utal, hogy ezeken a helyeken már kialakult a leválási buborék, a szélnyomás közel azonosnak tekinthető már ebben a zónában. Ugyanezek az esetek figyelhetőek meg a 45. és 46. ábrákon is. Továbbá szembetűnő, hogy a legfelső (15-ös) mérési pontban mind a három mérési esetben és minden oldalon szélszívás lép fel. Ennek a jelenségnek magyarázata lehet a torony geometriai kialakítása. A felső részen az áramlás irányát a torony megváltoztatja, így az felfelé mutat, tehát a szélszívást a felfelé áramló levegő adja. Ezt a jelenséget a vizualizáció során készített képeken is megfigyelhetjük. Hasonló jelenség történik az torony alsó, erőteljesen kiszélesedő szakasza felett is, bár számértékileg nem ennyire szembetűnő.

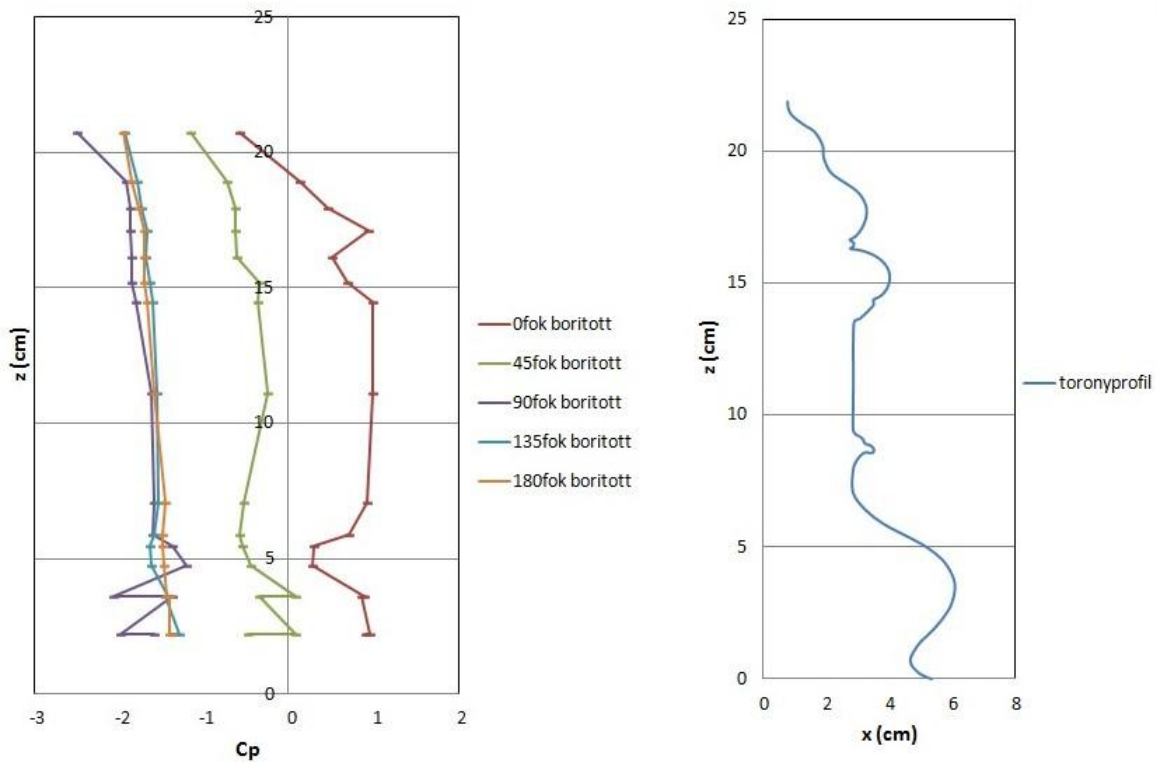
A nyomástényezők a felső nyitott terasz beborítása esetén nagyobbak lettek, mint beborítatlanul. Itt is bebizonyosodott - mint az erőmérés esetén - hogy ha a nyitott teraszrész beborítjuk, akkor a toronysisakra jelentősen nagyobb szélteher hat.



44. ábra Nyomástényezők a magasság függvényében a nyolcszög oldalára merőleges megfúvás esetén, a felső rész nyitva maradt



45. ábra Nyomástényezők a magasság függvényében az átlóirányú megfúvás esetén, a felső rész nyitva maradt



46. ábra Nyomástényezők a magasság függvényében a nyolcszög oldalára merőleges megfúvás esetén, a felső rész borított

A nyomásmérésből számított nyomástényezőkből erőtényezőket számoltunk, hogy össze tudjuk hasonlítani a két mérést. Ezt a következő összefüggésekkel számítottuk:

$$c_{F, \text{oldal}} = \sum c_{pi} \cdot A_i$$

, ahol c_{pi} az adott oldalon található pontokon mért nyomástényező, A_i a nyomáspontokhoz tartozó függőleges vetületi terület, $c_{F, \text{oldal}}$ az egy-egy oldalon fellépő szélteher értéke. Majd az így megkapott $c_{F, \text{oldal}}$ értékekkel tovább számoltuk a három mérési esetre. Az összesített erőtényezőt úgy kaptuk, hogy a nyomástényezőkből számított erőtényezőket téglalap módszerrel integráltuk a különböző mérési esetekben. A nyolcszög oldalára merőleges megfűvás esetén a következő képletekkel számoltuk az erőtényezőt:

$$c_{F, \text{össz}} = 2 \cdot (c_{F,1} \cdot 0,5 + c_{F,2} \cdot \cos 45^\circ + c_{F,3} \cdot \cos 90^\circ + c_{F,4} \cdot \cos 135^\circ + 0,5 \cdot c_{F,5} \cdot \cos 180^\circ)$$

$$c_f = c_{F, \text{össz}} / A_{\text{vet}}$$

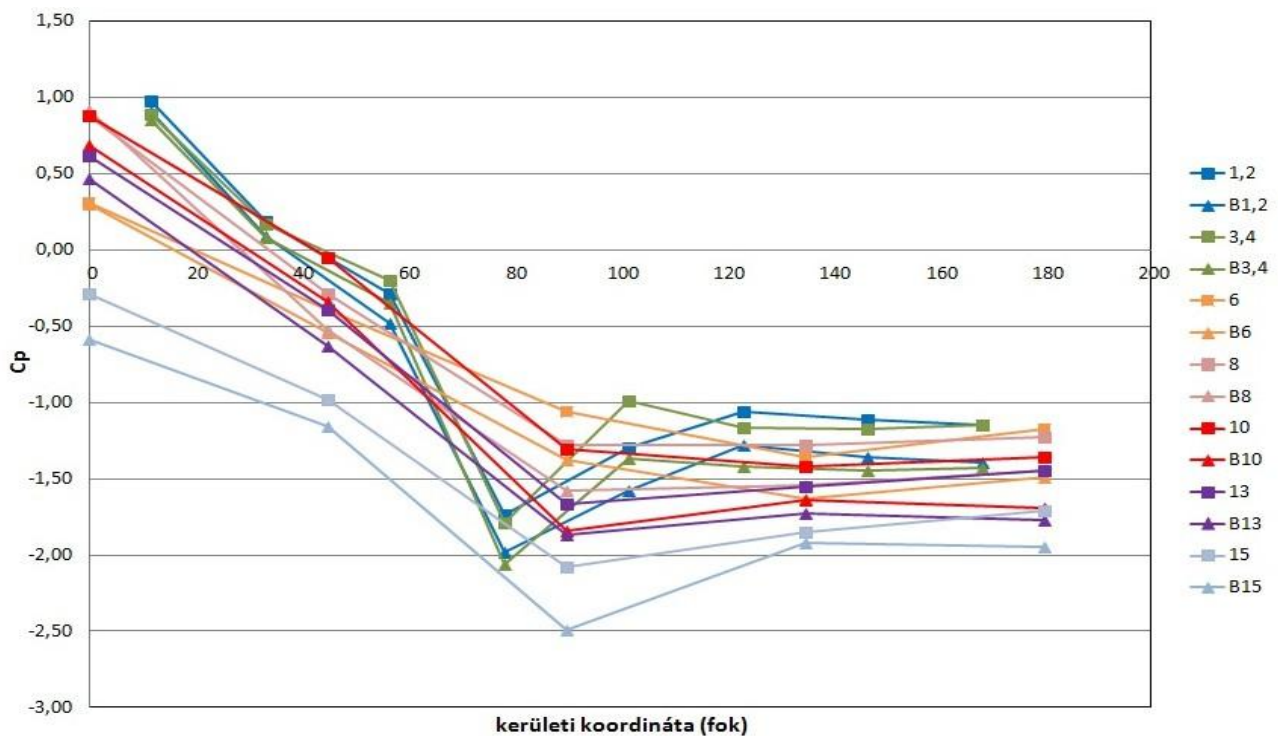
, ahol $c_{F,1...5}$ az előző képletből kapott értékek, melyek az egy-egy oldalakon fellépő szélteher értékei, melyeknek a széliránnyal párhuzamos komponenseit összegeztük. A_{vet} a toronysisak függőleges vetület összterülete. c_f a nyomástényezőkből számított ellenállástényező, melyet összehasonlíthatunk az erőmérésből számított erőtényezők átlagértékével.

	A nyolcszög oldalára merőleges megfűvás, a felső rész nyitva maradt.	Átlóirányú megfűvás, a felső rész nyitva maradt.	A nyolcszög oldalára merőleges megfűvás, a felső rész borított.
erőmérés	1,55	1,42	1,73
nyomásmérés	1,70	1,66	2,15

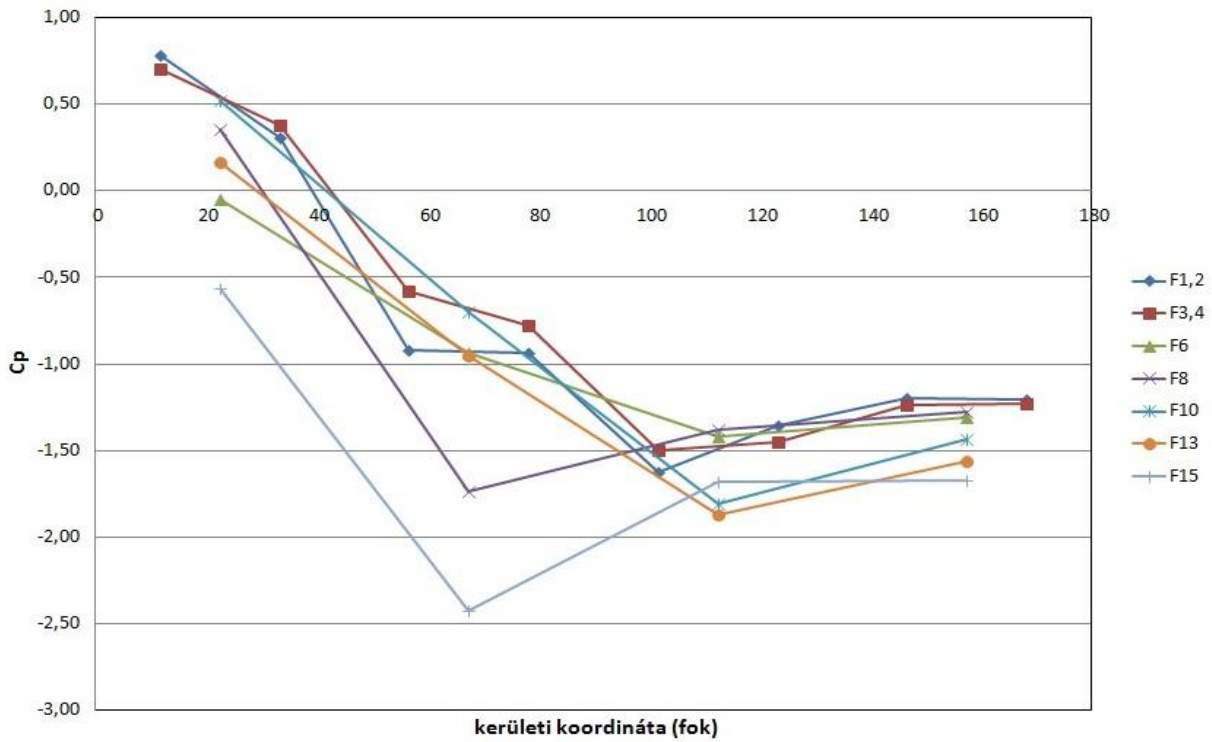
1.táblázat Erőmérésből és nyomásmérésből számított ellenállástényezők

Az erőmérésből számított ellenállástényezők (erőtényezők) kisebb értékeket mutatnak, mint a nyomásmérésből számítottak. Ez a viszonylag ritkán elhelyezett nyomásmérőpontoknak köszönhető. A 44.-46. ábrán látható, hogy a szélnyomás-szélszívás egy oldalon belül vált. De ez csak az alsó két síkban figyelhető meg, mivel csak itt lett egy oldalon belül 2-2 mérőpont elhelyezve. A többi magasságban csak mezőközepén egy mérőpontot helyeztünk el. Ha minden síkban 2-3 mérőpontot helyeztünk volna el, akkor a nyomásmérésből számított ellenállástényező az erőmérésből számított ellenállástényezőhöz közelítene. Az erőmérésnél az egész toronysisak ellenállását közvetlenül mértük, míg a nyomásmérésnél közvetve mértük a toronysisak egészére jellemző ellenállást.

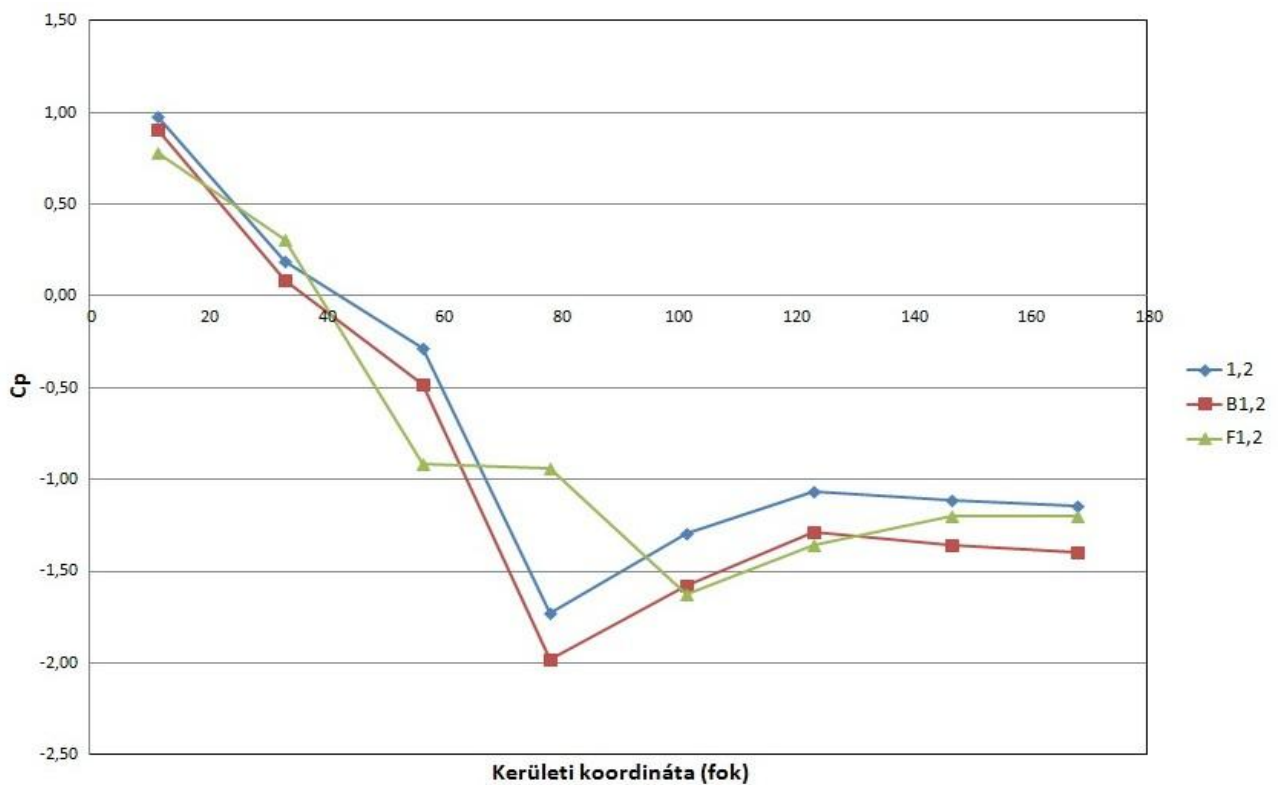
A nyomástényezőket a vízszintes metszeteken is ábrázoltuk. (47.-49.) A diagramokban a vízszintes tengelyen a mérőponthoz tartozó sugár és a széliránnyal bezárt szöge látható, így a toronysisak területét „kiterítettük”. A függőleges tengelyen a mérőpontokhoz tartozó nyomástényezőket ábrázoltuk. A megnövekedett szélszívás után a nyomás kiegyenlítődik, a nyomásgörbe vízszintesen ér véget. Itt található a leválási zóna.

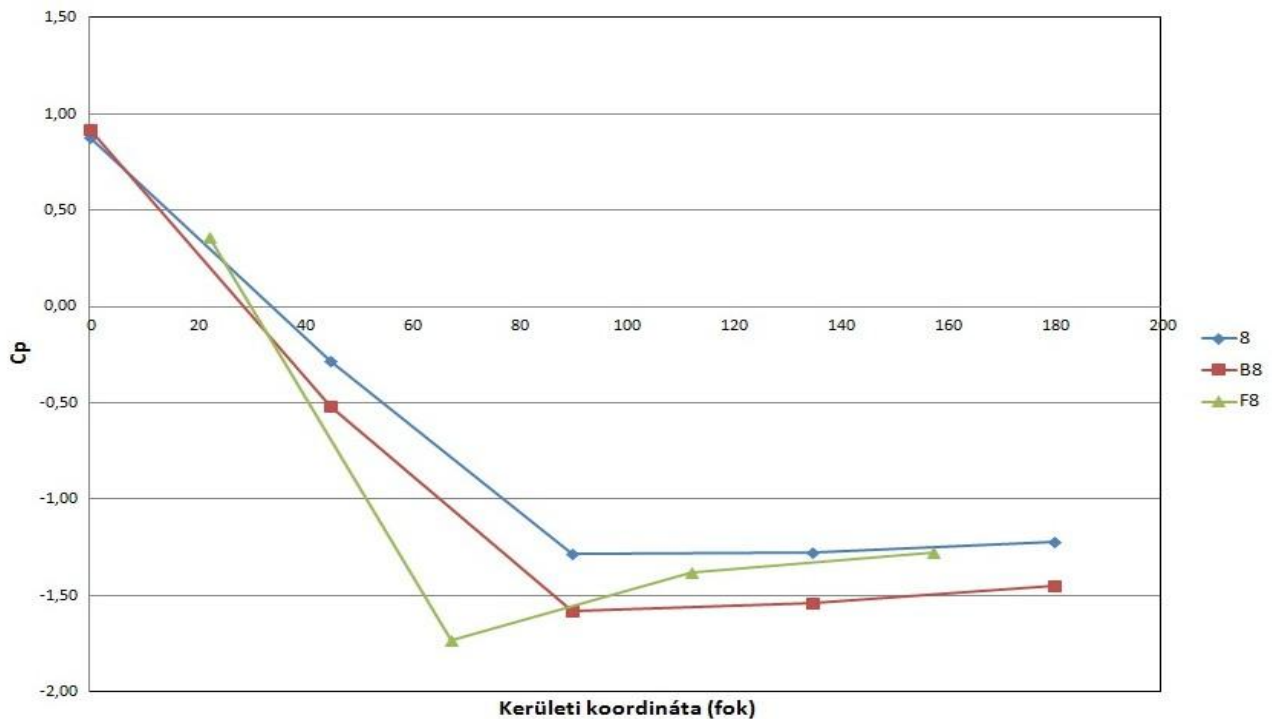


47. Nyomástényezők kerület mentén a nyolcszög oldalára merőleges megfúvás esetén, nyitott és borított esetben

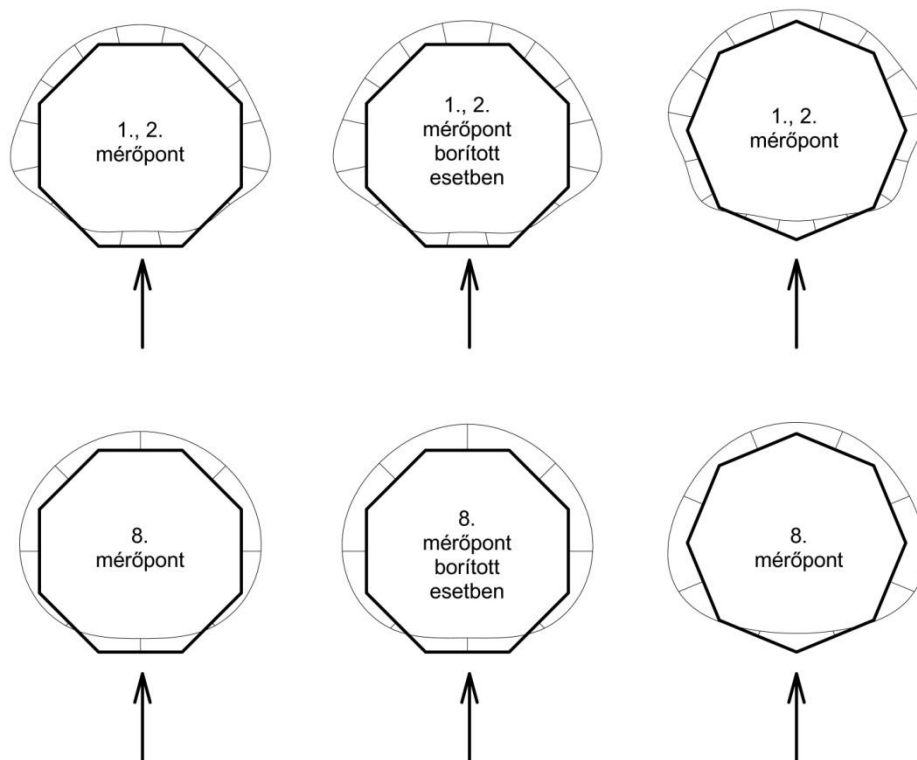


48. ábra Nyomástényezők kerület mentén az átlóirányú megfűvás esetén, a felső rész nyitott maradt





49. és 50. ábra Az 1-es, 2-es pontokra (legalsó vízszintes sík) és a 8-as pontra (alulról a 6. vízszintes sík) jellemző nyomástényezők kerület mentén a nyolcszög oldalára merőleges megfúvás esetén, nyitott és borított (B) esetben és az átlóirányú (F) megfúvás esetén (a felső rész nyitott maradt)



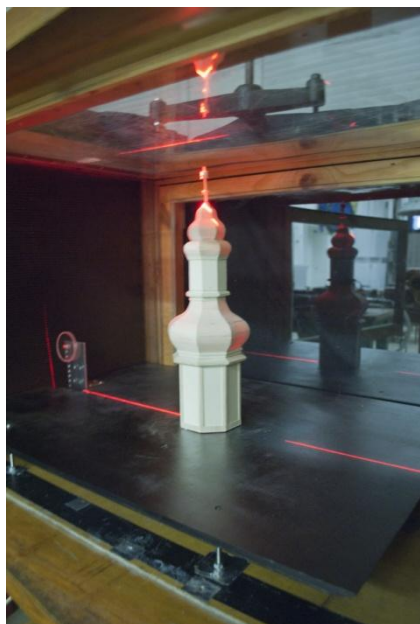
51. ábra Az 1. és a 6. vízszintes metszetben a toronyra ható szélteher a megfúvási irányokkal

A 51. ábrán a toronysisakra ható szélteher látható két különböző vízszintes metszeten felvéve. Mivel az 1. síkban oldalanként két mérési pont volt, így az első sorban található ábrák a valósághoz jobban közelítenek, mint a második sorban találhatóak, ahol oldalanként egy mérőpontot helyeztünk el. Ezek az ábrák a 49. és 50. ábrák megfelelői, az adott pontokon a mérőpontnak megfelelő c_p nyomástényezőt ábrázoltuk, csak itt meghagytuk a torony nyolcszög geometriáját, a területet nem „terítettük ki”.

4.2.5. Vizualizáció

A Tűztorony makettje körüli áramlást olajködös technikával tettük láthatóvá az áramlás egy síkmetszetének megjelenítésével, ahol a síkmetszet előállítását lézersík segítségével valósítottuk meg (52. ábra). A vizualizációt 6,5 m/s szélsébségen végeztük. Az olajködgenerátort a szélcsatorna elé helyeztük, az egyenletesítő kamra szitái előtt fűjtük be az olajködöt (53. ábra).

A vizualizációnál a torony nyolcszögletű részén nem tudtunk vízszintes síkot felvenni, mert hiába vittük lentebb az olajködgenerátort a szélcsatorna előtt, a konfúzor kialakítása miatt az olajködfelhőt megdobta és a mérőtérben így a legalacsonyabban fekvő sík, amit még meg lehetett fűjni, az a toronysisak alsó síkja volt. A fényképek számítógépes utómunkája során a jobb láthatóság érdekében szürkeárnyalatosra konvertáltuk a képeket, így a finomabb részletek is előhozhatóak a képek zavaró zajosodása nélkül.

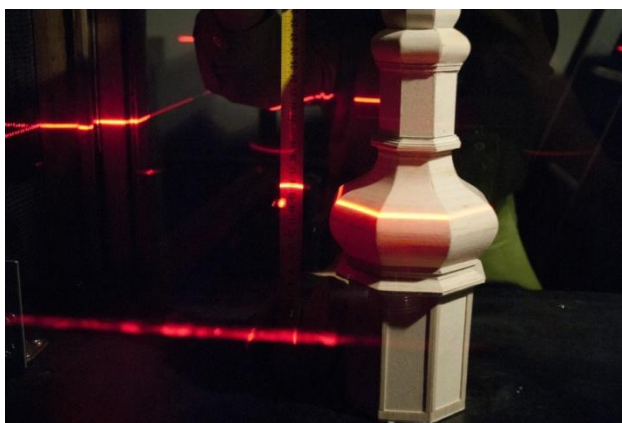


52. ábra A Tűztorony makettje a függőleges lézersíkkal megvilágítva a szélcsatorna mérőtérében

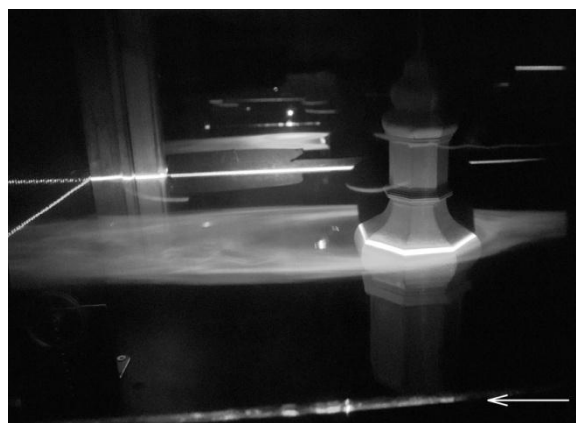


53. ábra Olajködgenerátor a szélcsatorna egyenletesítő kamrája előtt

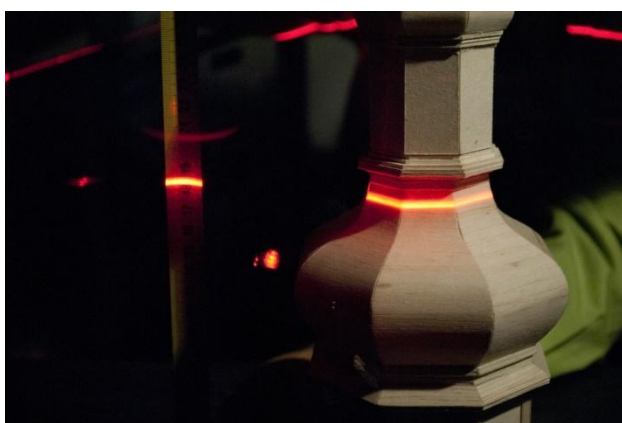
A vizualizációról készült fényképeken a várható áramlástani alapjelenségek figyelhetőek meg: az áramlással szembeni felületen torlópont kialakulása, az éles sarkú test mögött leválási (recirkulációs) zóna létrejötte. A vízszintes metszeteken a viszonylag nagy szélességgel végzett vizualizáció ellenére is láthatóak a leválási zónák, és a mögöttük kialakuló – alacsonyabb szélesség esetén jobban megfigyelhető - Kármán-féle örvénysorok. A leválási buborékba az áramlás kevés olajködöt tudott bekeverni. Ebben a zónában sokkal alacsonyabb az áramlási sebesség, de nagyobb a turbulencia, mint a zavartalanul áramló térben. A leválási zóna mérete függ az adott makett-metszet geometriájától. Az alsó öblösebb rész jobban szétteríti a leválási zónát (55. ábra), míg a keskenyebb részek mögött kisebb leválás alakul ki (57. ábra). A torony tetején lévő keskeny, antennaszerű rész már csak egy „csíkot húz” maga mögött (59. ábra).



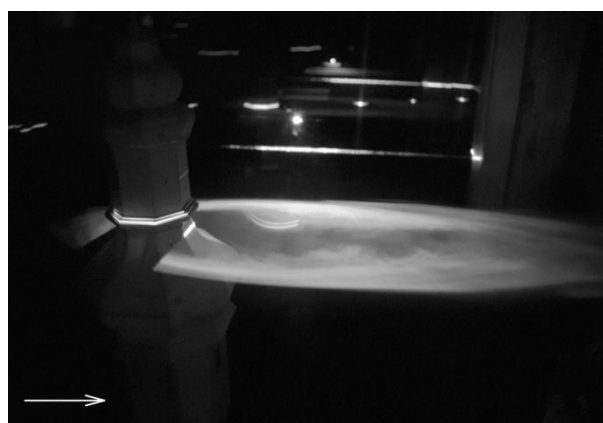
54. ábra A torony alsó öblös része lézersíkkal megvilágítva, magassági mérete



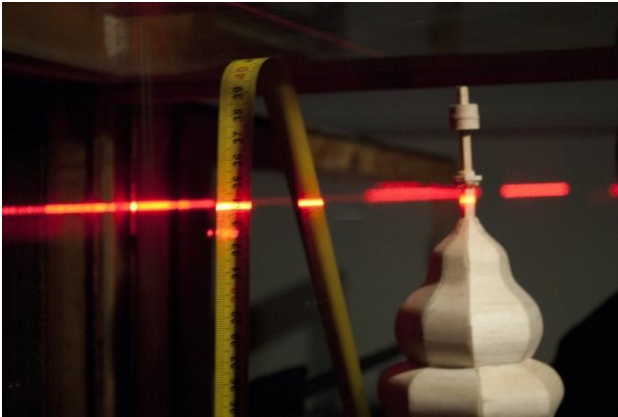
55. ábra A torony alsó öblös része lézersíkkal megvilágítva, leválási zónával



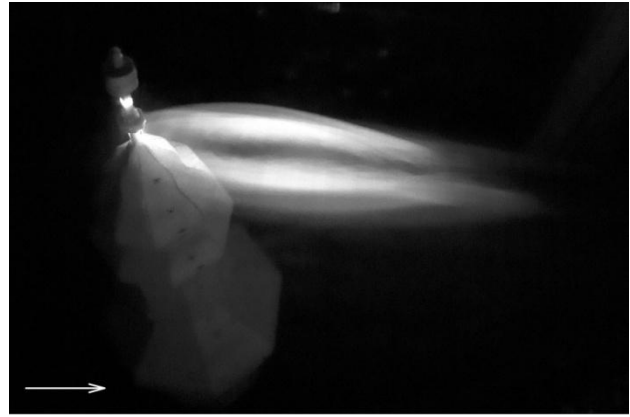
56. ábra A torony terasz alatti része lézersíkkal megvilágítva, magassági mérete



57. ábra A torony terasz alatti része lézersíkkal megvilágítva, leválási zónával és kialakuló örvényekkel



58. ábra A torony „antennája” lézersíkkal megvilágítva, magassági mérete



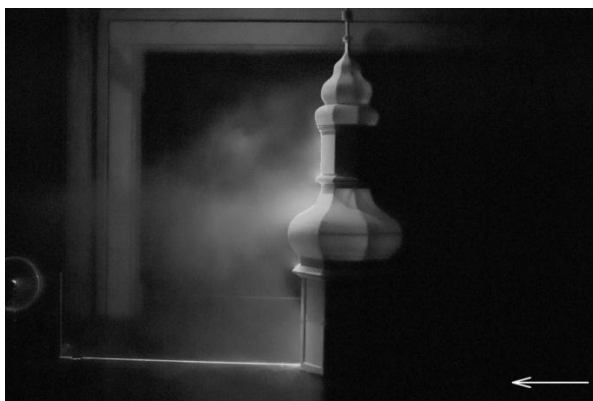
59. ábra A torony „antennája” lézersíkkal megvilágítva

A vizualizáció során függőleges síkokat is megvilágítottunk lézer segítségével. A 60. és a 61. ábrán a leválási zónát hátulról olajködpipával töltöttük fel, mivel a leválási zóna függőleges síkjait nehéz szélirányból érkező olajköddel telíteni, ritkán kavar be oda az áramlás olajszemcséket a leválási zónára jellemző alacsony szélnyomás miatt. A 62. ábrán látható fényképen viszont olyan pillanatot kaptunk el, amikor sikerült a szélirányból érkező olajköddel feltölteni a leválási zónát. Megfigyelhető a képeken, hogy a leválási buborékban az áramlás instacionárius, kaotikusnak is nevezhető. Jól látható ezen a képen, hogy a torony alsó szélesebb része a meghatározó, mögötte hosszan tart a leválási zóna, míg a torony felső része mögött kisebb leválás alakul ki.

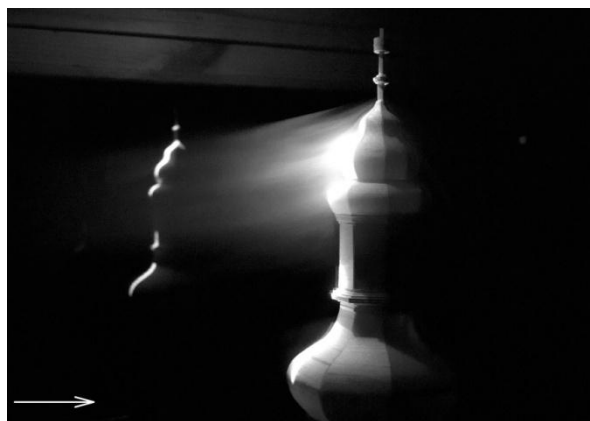
A 63. ábrán megfigyelhető, hogy az olajköd felkenődik az íveken. Ezzel láthatóvá vált az a jelenség, ami miatt a legfelső nyomásfuratban minden esetben negatív nyomásértéket mértünk. Hasonló áramlási viszonyok jönnek létre a terasz alatti sisakrészen is, de ott nem alakult ki szélszívás, csak a szélnyomás csökkent le.



60. és 61. ábra Épületmodell mögötti leválási zóna telítése hátulról olajköd-pipával



62. ábra Makett mögött kialakuló leválási zóna függőleges síkjá



63. ábra A torony tetején az olajköd felkenődik az íveken

5. Végeelem-modell

5.1 A szélterhek meghatározása

A toronyra ható valós szélterhek meghatározásához a szélcsatornában végzett mérési eredményeket, illetve az Eurocode 1 szabványban leírtakat használtuk fel.

Az épület egyes felületeire ható szélnyomás a szabvány szerint a külső és belső felületi szélnyomás előjeles összegéből állítható elő:

$$w = w_e + w_i.$$

A külső nyomás a $w_e = q_p(z_e) * c_{pe}$,

külső szívás $w_e = q_H * c_{pe}$,

a belső nyomás $w_i = q_p(z_i) * c_{pi}$,

belső szívás $w_i = q_H * c_{pi}$,

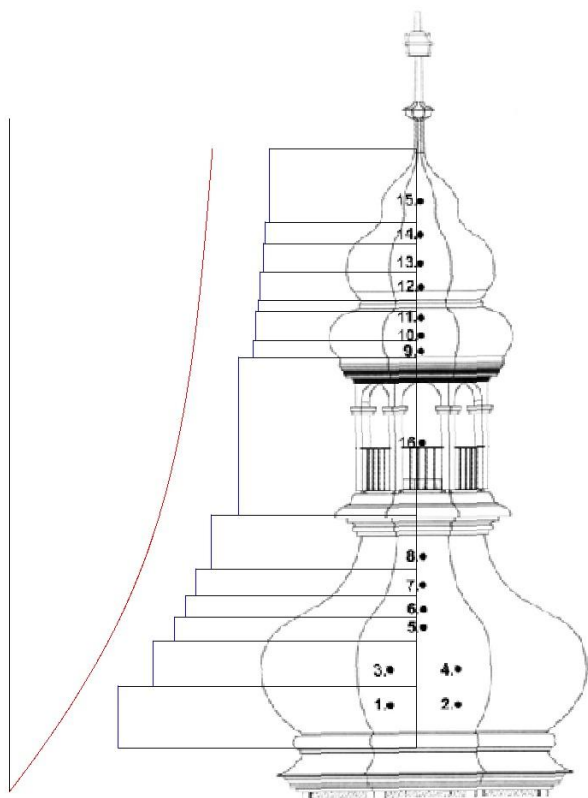
képletek alapján számítható, ahol $q_p(z)$ a szél torlónyomásának csúcserőértéke a magasság függvényében, z_e a terepszint feletti külső referenciamagasság, z_i a belső referenciamagasság, q_H az épület mögött kialakuló, magasságtól független szélszívás értéke (a torony legmagasabb pontjához tartozó szélnyomás értéke előjelhelyesen), c_{pe} a külső felületi szélnyomás alak tényezője, c_{pi} pedig a belső nyomás/szívás alak tényezője.

Az Eurocode szerint az épületekben a felületek légáteresztő képessége miatt minden esetben keletkezik belső nyomás, illetve szívás, attól függően, hogy a széliránnyal szemközti vagy azzal átellenes oldalán nyitott az épület, így a belső nyomásviszonyok függvényében két esetet különböztethetünk meg. Belső nyomás esetén $c_{pi} = +0,2$, belső szívás esetén pedig $c_{pi} = -0,3$.

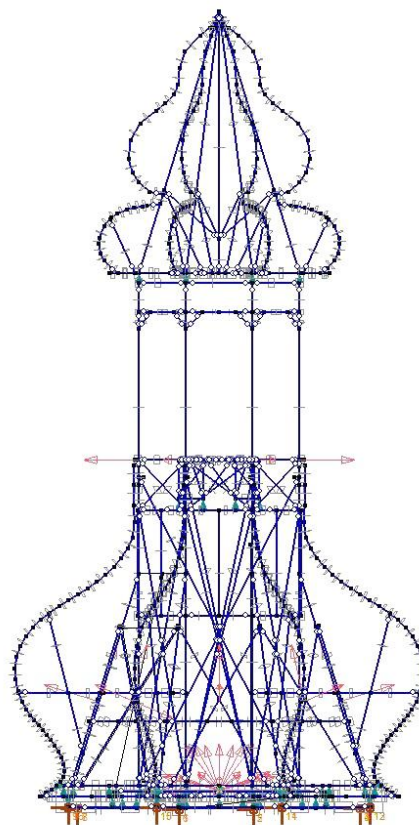
A számítás során 6 terhelési esetet vettünk figyelembe:

1. Megfúvás a nyolcszög oldalára merőlegesen, nyitott teraszrész, belső nyomás
2. Megfúvás a nyolcszög oldalára merőlegesen, nyitott teraszrész, belső szívás
3. Megfúvás a nyolcszög átlójának irányában, nyitott teraszrész, belső nyomás
4. Megfúvás a nyolcszög átlójának irányában, nyitott teraszrész, belső szívás
5. Megfúvás a nyolcszög oldalára merőlegesen, borított teraszrész, belső nyomás
6. Megfúvás a nyolcszög oldalára merőlegesen, borított teraszrész, belső szívás

A torony egyes oldalainak felületét a szélcsatorna-modellen lévő nyomásfuratoknak megfelelően 15, ill. 16 terhelési mezőre osztottuk fel, az egyes felületekhez tartozó $q_p(z_e)$ magassági értéket a furat magasságához lineárisan interpoláltuk (64.ábra). A belső nyomáshoz tartozó z_i referenciaértéknek a torony felső pontját tekintettük.



64. ábra $q_p(z)$ torlónyomás profil (piros) és a terhelési mezők $q_p(z_e)$ (kék) értékeinek viszonya



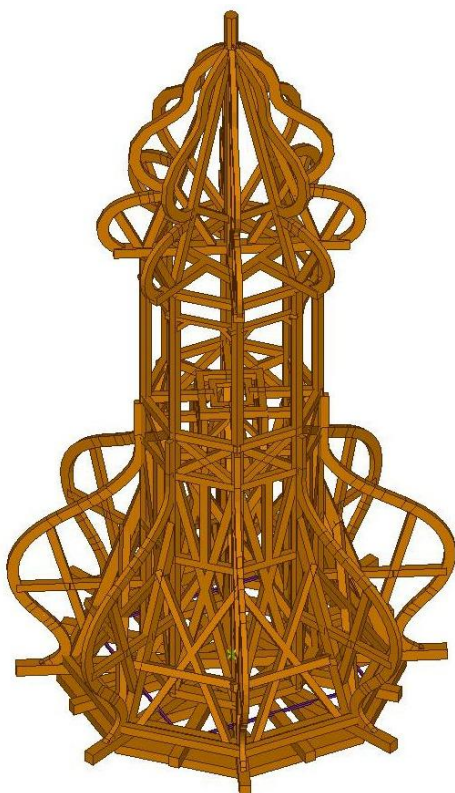
65. ábra Végeselemes drótváz

5.2 A végeselem-modell

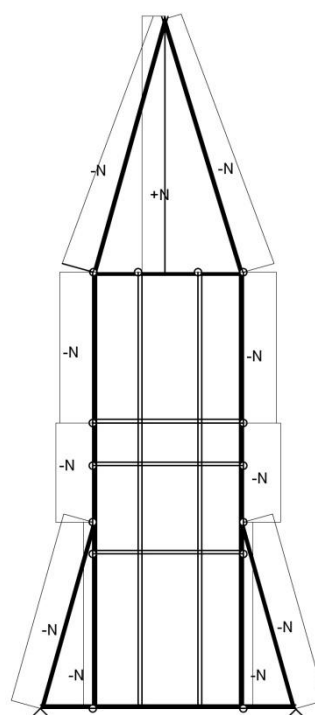
Az rendelkezésre álló felmérési rajzok, illetve a helyszíni szemle alapján a toronyszerkezet geometriáját AutoCad segítségével állítottuk elő. Ezt AxisVM-be importálva végeselem modellt készítettünk a szerkezetről (65. és 66. ábra). A síkban kapcsolódó rudak esetén a kapcsolatot szinte minden esetben csuklós kapcsolattal modelleztük, kivételt képez ez alól az íves ramonádokat megtámasztó ferde oszlop ill. gerenda, ahol a síkbeli csuklós kapcsolt instabil kialakítást eredményezett volna. Ebben az esetben egy rövid U alakú merevtesttel kerültük el az összemetsződést. A kapcsolódó, ám kitérő súlyvonalú rudak összekötésére végtelen merevségű csuklós kapcsolati elemeket alkalmaztunk. Az íves ramonád kialakítása egy több szegmensből álló, egymáshoz mereven kapcsolt rúdrendszerből történt. A szerkezet megtámasztását térbeli csuklókkal

biztosítottuk: a falra felfekvő sárgerendák csúcspontjaiban, illetve az ezzel egy síkban lévő erőteljes gerendapárok végpontjaiban. (70.ábra)

A szerkezet terheinél a rudak önsúlyterhén kívül a ramonádokat borító deszkázat terhét is figyelembe vettük felületen megoszló teherként. A deszkázatot csupán teherként szerepeltettük a modellen, nem vett részt a szerkezet erőjátékában. A szélterheket a ramonád rúdelemeire szétszított megoszló teherként a felületre merőlegesen helyeztük el. Az előzőekben ismertetett hat terhelési esethez hat teherkombinációt hoztunk létre, amelyekben az önsúlyterheket $\gamma_g = 1,00$; az egyes szélterheket pedig $\gamma_q = 1,5$ -ös biztonsági tényezővel vettük figyelembe.



66.ábra Háromdimenziós modell



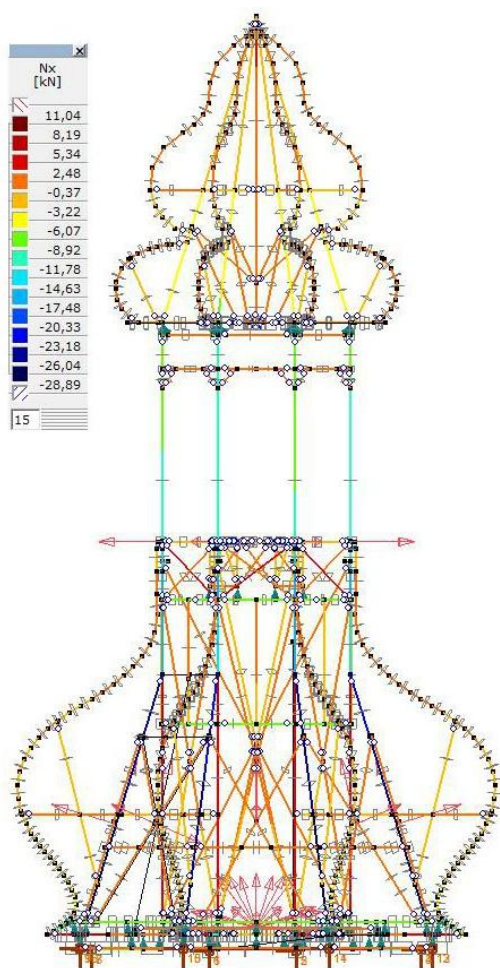
67. ábra A szerkezet vázlatos működése önsúlyra, normálerők

5.3 Eredmények

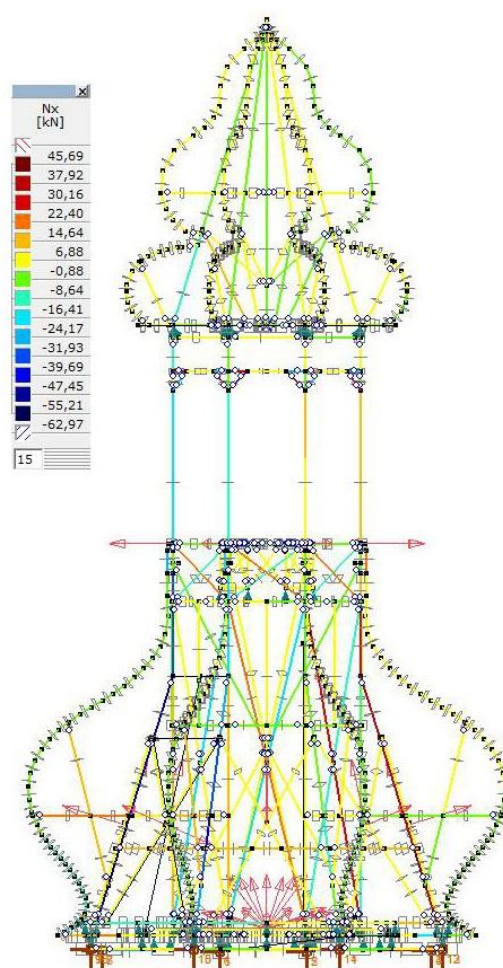
A számítási eredmények alapján megállapítható, hogy a toronyszerkezet önsúlyteher esetén terheit nagyrészt a ferde dúcok közvetítésével a torony szélén körbefutó sárgerendák csúcsainak környezetében adja át a toronytestre, a középen álló nyolc összefogott oszlopot a ferde támaszok mintegy felfüggesztik, így a szerkezetileg "lágyabb" gerendázatot tehermentesítik (67.ábra). A ferde dúcok csatlakozásánál az oszlopokban nyomaték keletkezik a vízszintes erőkomponens miatt, ezt a csatlakozási pont alatt és felett elhelyezkedő gerendagyűrű veszi fel. A felső sisakrészen is hasonló

viselkedés figyelhető meg, a császárfában húzás ébred, a terheket a ferde támaszok közvetítik az alsó nyolc darab ötszögletű oszlopra.

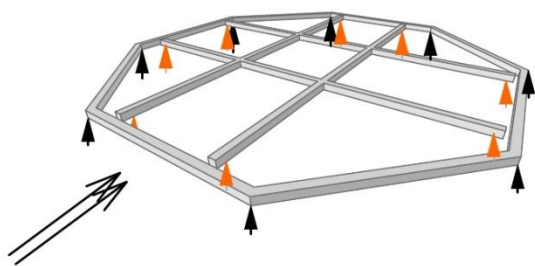
A torony erőjátéka szélteher hatására átrendeződik, a szélárnyékos oldalon jelentős nyomóerők adódnak a támaszokra, míg a széltámadta oldalon ellentétes irányú támaszerők ébrednek (68. és 69. ábra). Megfigyelhető, hogy az erőjátékban szélteher esetén is jelentős szerepet kapnak a ferde dúcok. A széltámadta oldalon húzott rúdként viselkednek, továbbá a belső 8 oszlopot összefogó, széliránnyal párhuzamos, ill. 45 fokos szöget bezáró andrás-kereszttrácsolás is részt vesz az szélteherből ellensúlyozásában. A 71.-73. ábrákon a sarokpontokon fellépő erőket ábrázoltuk néhány teherkombináció esetén. Látható, hogy a szerkezet önsúlyából közel azonos támaszerőket kapunk, míg szélteher esetén a széltámadta oldalon minden esetben lefelé mutató támaszerőre van szükség, vagyis a toronysisakot le kell kötni a toronytesthez.



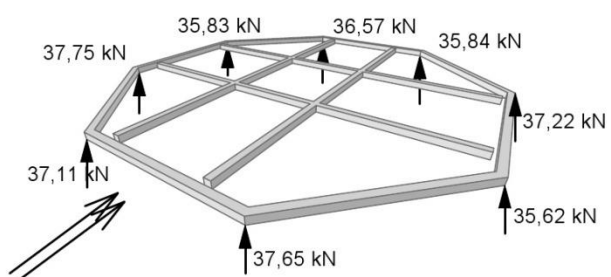
68. ábra A rudakban ébredő normálerő önsúly hatására



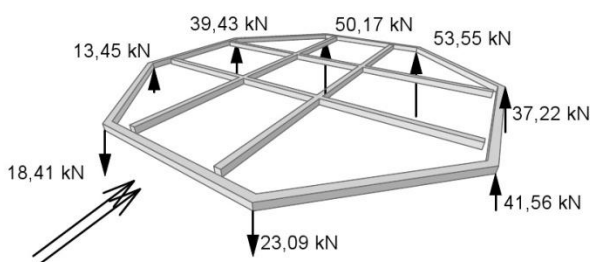
69. ábra A rudakban ébredő normálerő önsúly és szélteher esetén



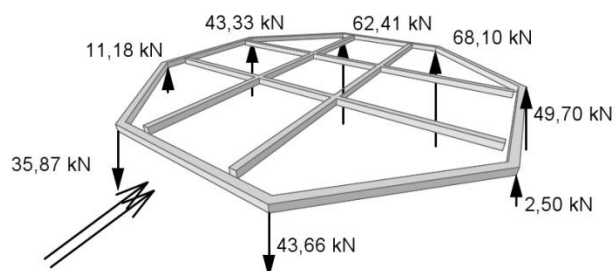
70. ábra Megtámasztási viszonyok



71. ábra Támaszerők önsúlya



72. ábra Támaszerők önsúly és merőleges megfűvás, belső nyomás esetén



73. ábra Támaszerők merőleges megfűvás, borított teraszrész, belső nyomás esetén

6. Összefoglalás

A Soproni Tűztorony vizsgálatának célja a szerkezet erőjátékának és szélhatással szembeni állékonyságának vizsgálata volt. A kutatások során megismertük a történeti toronyszerkezetek fejlődéstörténetét, szerkezeti kialakításukat. A helyszínen felmértük a torony jelenlegi állapotát, a korábbi felméréseket szükség szerint kiegészítettük, esetenként pontosítottuk. A szélteher, mint a toronyra ható legmeghatározóbb teher értékének megállapításához szélcsatorna-kísérleteket végeztünk, melyek során erőméréssel megállapítottuk a torony egészére vonatkoztatott erőtenyezőt, illetve nyomásméréssel a felületekre vonatkoztatott alaki tényezőket. A két kísérlet összevetésekor kiderült, hogy a nyomásmérés során az alkalmazottnál sűrűbb mérőpont-kiosztást célszerű alkalmazni, a mérés pontosságának növelése érdekében. Az eredményeket ettől eltekintve a várakozásnak megfelelőnek ítéltük, a nyomástényezőket kiinduló adatként a további számításokhoz alapul vettük. A szokványostól eltérő értékeket, a görbült felület menti nyomáseloszlás-változásokat olajködös vizualizációval is igazoltuk. A torony állékonyságának vizsgálatához végeselemes modellt hoztunk létre, amelyen a kísérletekből meghatározott alaki tényezőkkel számított szélterhet működtettük. A kapott eredményekből megérthető a bonyolult rúdszerkezet erőjátéka, illetve kimutathatóvá vált a szerkezet lekötésének szükségessége.

Ahhoz, hogy a toronysisakok szélterhét közelítő módszerekkel vizsgálhassuk számos további torony aerodinamikai és statikai vizsgálatára van még szükség. A jelen dolgozatban bemutatott módszerek alkalmazásával, az általunk elvégzett kísérleti eredmények alapján pontosított méréstechnikával, esetleg részletesebb végeselemes modell kidolgozásával nyert pontos adathalmaz felhasználásával lehetne közelítő számítási módszert kidolgozni a toronysisakok szélterhének felvételére.

7. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban Dr. Sajtos István és Dr. Armuth Miklós tanár úrnak (Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék) tartozunk köszönettel, akik sok értékes tanáccsal, hasznos tudnivalóval és jelentős irodalommal segítettek munkánkat és a dolgozat megírását. A helyszíni vizsgálatoknál szakértő segítséget nyújtottak.

Köszönettel tartozunk még Dr. Lajos Tamás professzor úrnak és Balczó Mártonnak, továbbá az Áramlástan Tanszéknek, hogy lehetővé tették a mérések végrehajtását és segítettek nekünk a labormérésekben, a mérési eredmények kiértékelésében, ezentúl kellő szakirodalommal járultak hozzá a dolgozat elkészítéséhez. Köszönjük Gulyás Andrásnak a toronymakett vizualizációjánál nyújtott segítségét.

Továbbá köszönjük szépen Bakondi János tanár úrnak (Épületszerkezettan Tanszék, nyugalmazott egyetemi docens), hogy szakított ránk időt, és készséggel válaszolt minden kérdésünkre a Soproni Tűztoronnyal kapcsolatban.

8. Irodalomjegyzék

- Mojzer Miklós: Torony, kupola, kolonnád (Művészettörténeti füzetek 1); Akadémiai Kiadó, Budapest 1971. (13-25)
- Dr. Gábor László: Épületszerkezettan III., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (12-58)
- Pattantyús-Ábrahám Ádám: Tetőszerkezetek a rómaiak korától a XX. század végéig, Szerző kiadása 2011. (62-64)
- Déry Attila: Öt könyv az építészetéről, Gyakorlati műemlékvédelem 3. kötet Faanyagú födémek, tetők, falak TERC Kiadó, Budapest 2010. (208-222)
- Magyar Építőművészet-különszám: Sándy Gyula: Tetőszerkezetek, ácsmunkák 1932.
- Magyarország Műemléki topográfiája 1. kötet, Győr-Sopron megyei műemlékei I. rész, Sopron és környéke műemlékei, Akadémiai Kiadó, Budapest 1953. (152-156)
- Holl Imre: Sopron Középkori Városfalai IV. ARCHEOLÓGIAI Értesítő 100. évfolyam 73. év 2.sz. 1974. (180-206)
- Dr. Gömöri János: Castrum Sopron, Sopron vára az Árpádkorban, Győr-Moson-Sopron Megyei Múzeumok Igazgatósága Sopron 2002. (13-14, 49-93)
- Storno Miksa: A Soproni Várostorony alaki változásai, Soproni szemle XI. évfolyam 1-2 szám 1957. (103-108)

- Kissné Nagy Pál Judit: A várostorony és környéke helyreállítása Sopronban, Magyar Építőművészet 1975/5
- Dr. Gömöri János: A Várostorony nagyobb építészeti és alapátadások régészeti vizsgálata, Sopron, 2001. nov. 21.
- Sedlmayer János: A Sopron Tűztorony középkori kialakításának és mai állapotának vizsgálatához elméleti rekonstrukció (1200-1680), építészeti szakvélemény, 2002.
- Müller Imre: Faanyagvédelmi szakvélemény a soproni Tűztorony faszerkezeteinek faanyagvédelmi vizsgálatáról, 2011.
- Bakondi János tanár úr elbeszélése (Épületszerkezettan Tanszék, nyugalmazott egyetemi docens)
- Jerzy Antoni Zuranski: A szél hatása az építményekre, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986. (134-189)
- Deák-Erdélyi-Fernezeyi-Kollár-Visnovitz: Terhek és hatások, Tervezés az Eurocode alapján, Készült a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékén, 2006. (49.-66.)
- Kollár Lajos: A szél dinamikus hatása az építményekre, TERC Kiadó, Budapest (13.-27.)
- Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, Műegyetemi kiadó, Budapest 2008. (121-534)
- BME Áramlástan Tanszék: Antennatornyok szélcsatorna vizsgálata, kutatási jelentés, 2010. március 16.
- Balczó Márton: Kétkomponensű erőmérő platform az NPL szélcsatorna számára, dokumentáció, 2011. tavasz

Internetes források (hozzáférések 2011. szeptember):

www1:<http://www.muzeum.sopron.hu>

www2: http://szolnokigyalogoshid.hu/blog/?page_id=232

9. Ábrajegyzék

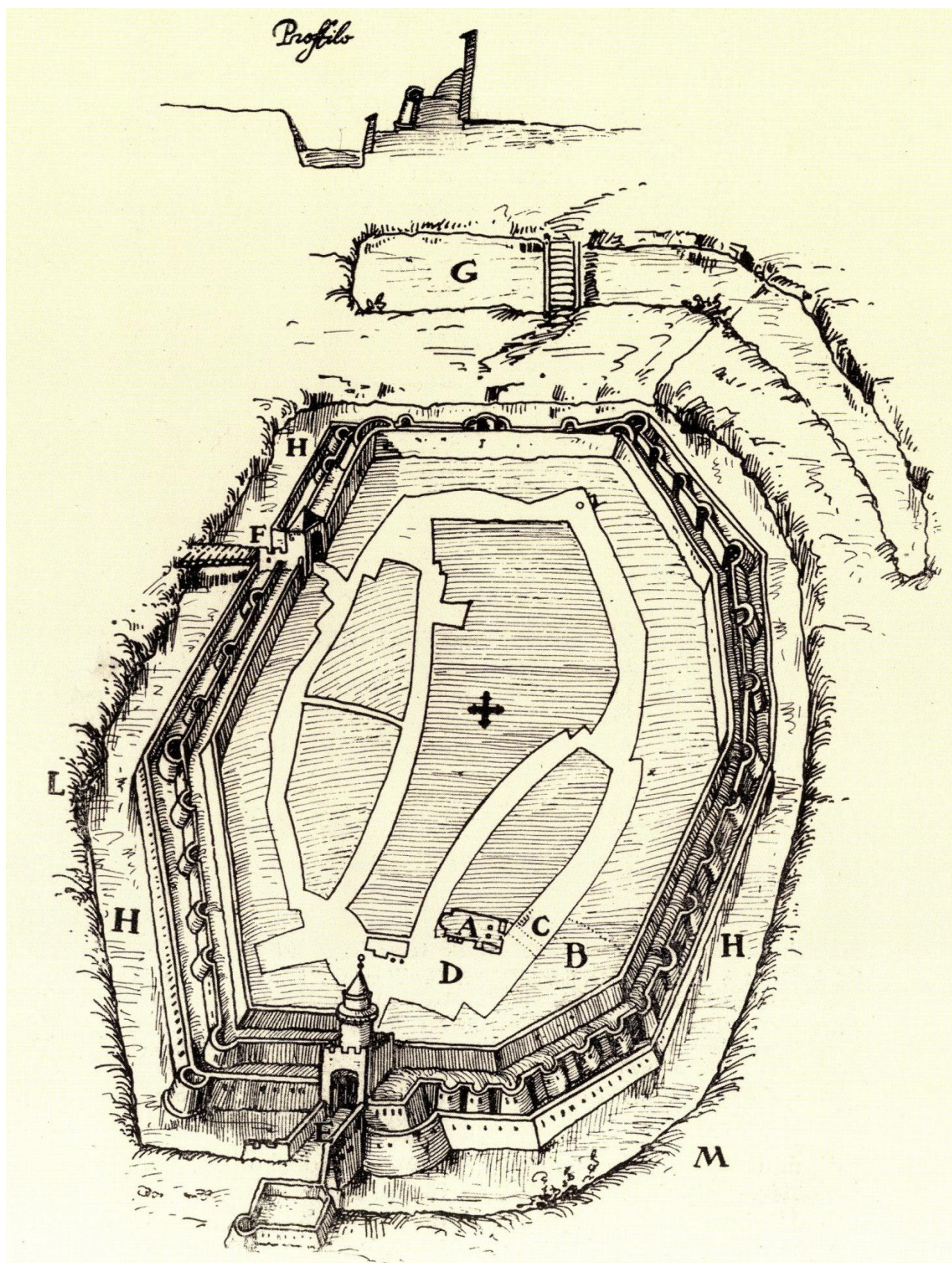
1. ábra A soproni sánc elméleti rendszere (forrás: Gömöri)
2. ábra Sopron vára a XI. században (forrás: Gömöri)
3. ábra Sopron képe az 1562-től megjelenő bécsi naptárakban (Soproni Múzeum fotótára, 35146)
4. ábra A soproni Várostorony alaki változásai (forrás: Soproni szemle XI. évfolyam 1957.1-2 szám)
5. ábra A toronyaljba süllyesztett falazott csatorna metszete
6. ábra A Tűztorony alsó négy szintjének alaprajza (1952.)
7. ábra A Tűztorony homlokzata és metszete, 1952.
8. ábra A toronyszerkezet belseje
9. ábra A toronyszerkezet ferde dúcai, síkban elhelyezett andráskereszt merevítéssel
10. ábra Talpszelemen lekötése
11. ábra A toronysisak alsó, középső része
12. ábra A toronysisak felső zárt részének bejárata a nyitott teraszról
13. ábra A toronysisak felső zárt részének ramonádja
14. ábra Toronytető kialakítási változatai a) rombuszfedeles torony b)krakkói Fekete Mária templom tornya c) Kreml oldaltornya d) budapesti szent Anna templom tornya e) Vaszilij Blazsenyij székesegyház toronyegyüttese (forrás: Gábor III.)
15. ábra Császárfás tetősisak a XVIII. században (forrás: Déry)
16. ábra Császárfás toronytető merevítőszintekkel (forrás: Déry)
17. ábra Möller-típusú toronysisak (forrás: Déry)
18. ábra Barokk toronysisak (forrás: Déry)
19. ábra Torony tömbjéhez rögzített császárfás toronysisak (forrás: Déry)
20. ábra Hagymás toronyfedés a XIX. században (forrás: Déry)
21. ábra Belső galériás toronysisakok (forrás: Déry)
22. ábra Épület körüli széláramok (forrás: Zuranski)
23. ábra. Test mögötti leválási buborék
24. ábra. Egy körhenger a) lamináris és b) turbulens körüláramlása
25. ábra Betz-mikromanométer (forrás: Lajos)
26. ábra Prandtl-cső (forrás: Lajos)
27. ábra Nyitott áramú, szívott üzemű, zárt merőterű szélcsatorna (BME, Áramlástan Tanszék, Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratórium)
28. ábra Szélcsatorna rajza és működési elemei
29. ábra Az 1:75-ös makett fotói: a) toronymakett teljes magasságában, b) a toronysisak közeli fotója
30. ábra Kétkomponensű erőmérő Solid Works modellje

- 31. ábra Kétkomponensű erőmérő fotója a makettel
- 32. ábra A két cella rögzítése a platform alaplemezen
- 33. ábra Az erőmérő felső, állítható része a toronysisakhoz ragasztva
- 34. ábra Tűztorony makettje a kétkomponensű erőmérő platformmal
- 35. ábra Makett borított esetben
- 36. ábra A felső nyitott rész
- 37. ábra Nyomásmérő furatok helye a maketten
- 38. ábra Nyomásmérésre előkészített modell a szélcsatornában
- 39., 40. ábra Pressure&Force Labview mérőprogram grafikus felülete
- 41. ábra Erőmérésből számított erőtenyezők a Reynolds-szám függvényében a nyolcszög oldalára merőleges megfűvás eseteiben
- 42. ábra Erőmérésből számított erőtenyezők a Reynolds-szám függvényében a nyolcszög átlójának irányában történő megfűvás eseteiben
- 43. ábra Erőtenyezők átlagértékei és a hibasávok a nyolc különböző esetben
- 44. ábra Nyomástényezők a magasság függvényében a nyolcszög oldalára merőleges megfűvás esetén, a felső rész nyitva maradt
- 45. ábra Nyomástényezők a magasság függvényében az átlóirányú megfűvás esetén, a felső rész nyitva maradt
- 46. ábra Nyomástényezők a magasság függvényében a nyolcszög oldalára merőleges megfűvás esetén, a felső rész borított
- 47. Nyomástényezők kerület mentén a nyolcszög oldalára merőleges megfűvás esetén, nyitott és borított esetben
- 48. ábra Nyomástényezők kerület mentén az átlóirányú megfűvás esetén, a felső rész nyitott maradt
- 49. és 50. ábra Az 1-es, 2-es pontokra (legalsó vízszintes sík) és a 8-as pontra (alulról a 6. vízszintes sík) jellemző nyomástényezők kerület mentén a nyolcszög oldalára merőleges megfűvás esetén, nyitott és borított (B) esetben és az átlóirányú (F) megfűvás esetén (a felső rész nyitott maradt)
- 51. ábra Az 1. és a 6. vízszintes metszetben a toronyra ható szélteher a megfűvási irányokkal
- 52. A Tűztorony makettje a függőleges lézersíkkal megvilágítva a szélcsatorna mérőterében
- 53. ábra Olajködgenerátor a szélcsatorna egyenletesítő kamrája előtt
- 54. ábra A torony alsó öblös része lézersíkkal megvilágítva, magassági mérete
- 55. ábra A torony alsó öblös része lézersíkkal megvilágítva, leválási zónával
- 56. ábra A torony terasz alatti része lézersíkkal megvilágítva, magassági mérete
- 57. ábra A torony terasz alatti része lézersíkkal megvilágítva, leválási zónával és kialakuló örvényekkel
- 58. ábra A torony „antennája” lézersíkkal megvilágítva, magassági mérete
- 59. ábra A torony „antennája” lézersíkkal megvilágítva
- 60. és 61. ábra Épületmodell mögötti leválási zóna telítése hátulról olajködpipával
- 62. ábra Makett mögött kialakuló leválási zóna függőleges síkja

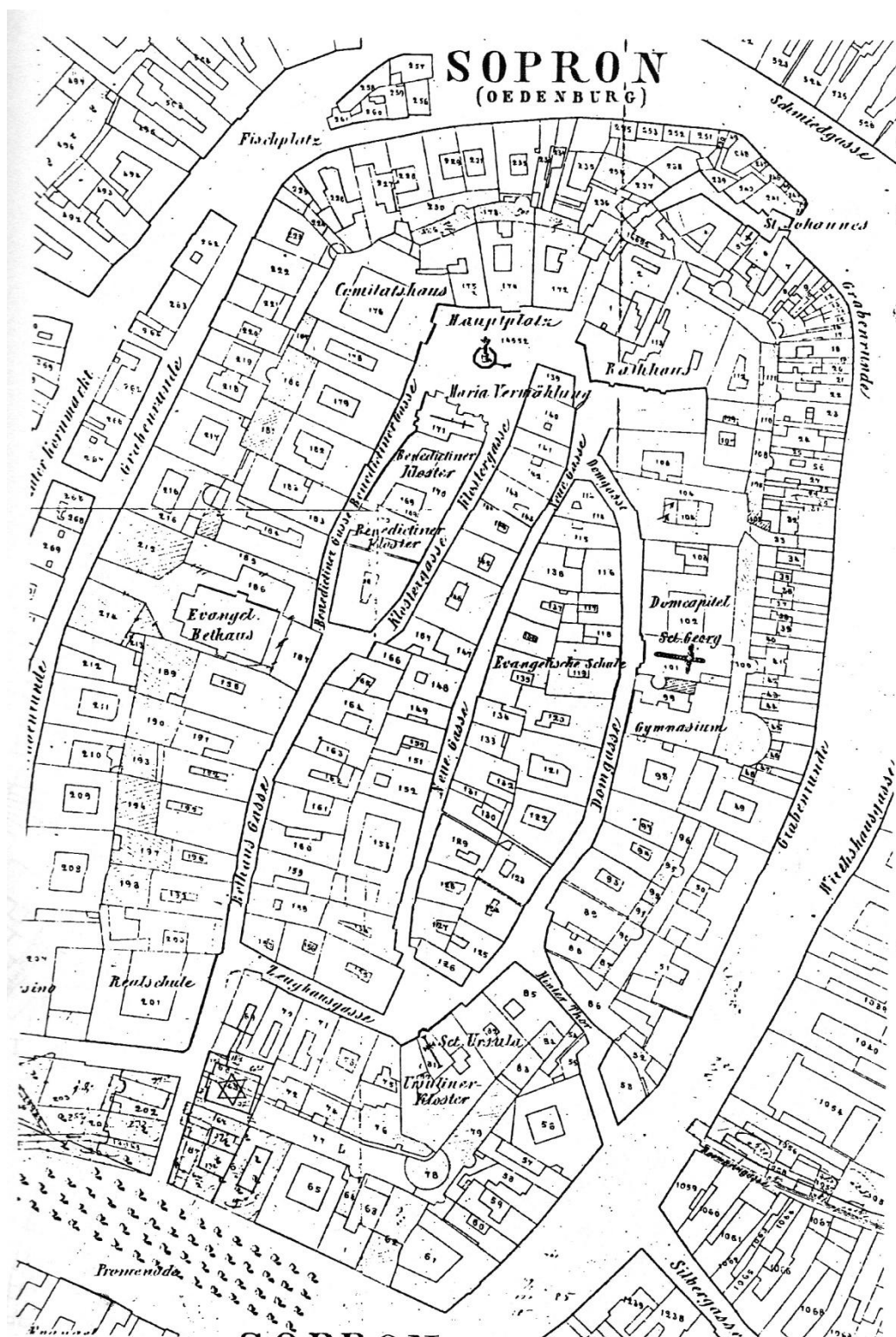
- 63. ábra A torony tetején az olajköd felkenődik az íveken
- 64. ábra $q_p(z)$ (piros) és $q_p(z_e)$ (kék) viszonya
- 65. ábra Végeselemes drótváz
- 66. ábra Háromdimenziós modell
- 67. A szerkezet vázlatos működése önsúlyra
- 68. ábra A rudakban ébredő normálerő önsúly hatására
- 69. ábra A rudakban ébredő normálerő önsúly és szélteher esetén
- 70. Megtámasztási viszonyok
- 71. Támaszerők önsúlyteherre
- 72. Támaszerők önsúly és merőleges megfűvás, belső nyomás esetén
- 73. ábra Támaszerők merőleges megfűvás, borított teraszrész, belső nyomás esetén

1. táblázat Erőmérésből és nyomásmérésből számított ellenállástényezők

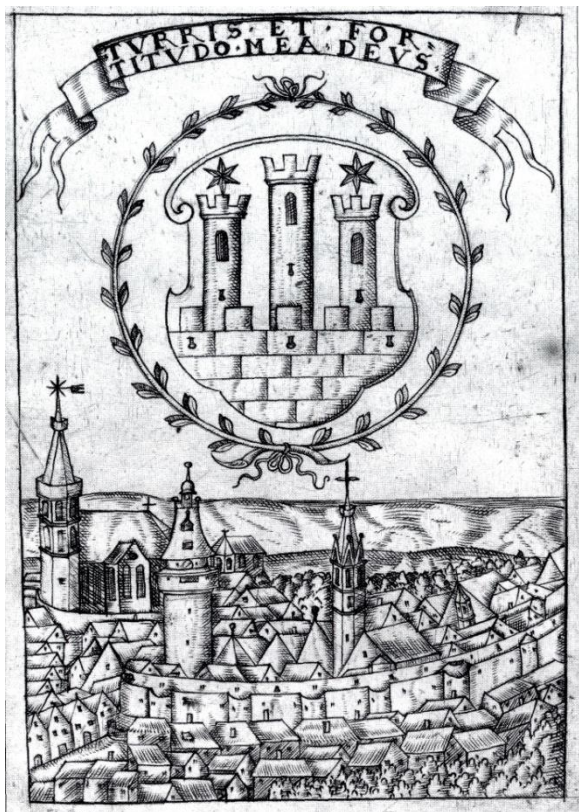
MELLÉKLETEK



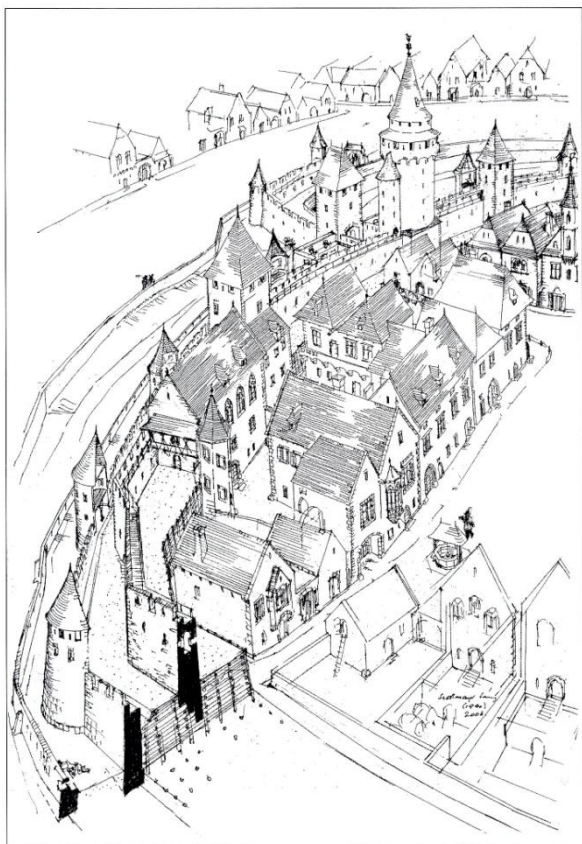
1.melléklet Sopron belvárosának alaprajza, 1622. (Nagypál Judit nyomán)



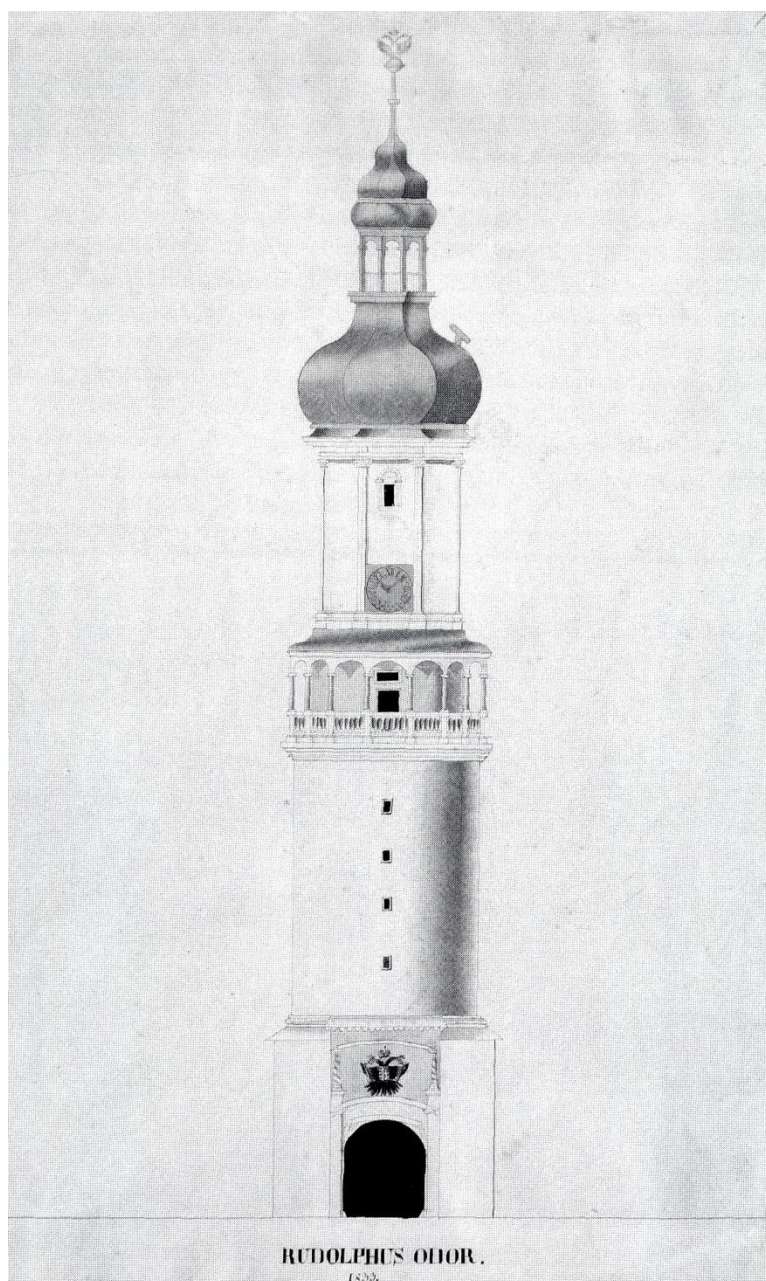
2. melléklet Sopron városának kataszteri térképe a XIX. század utolsó harmadában rávezetett újabb építésekkel



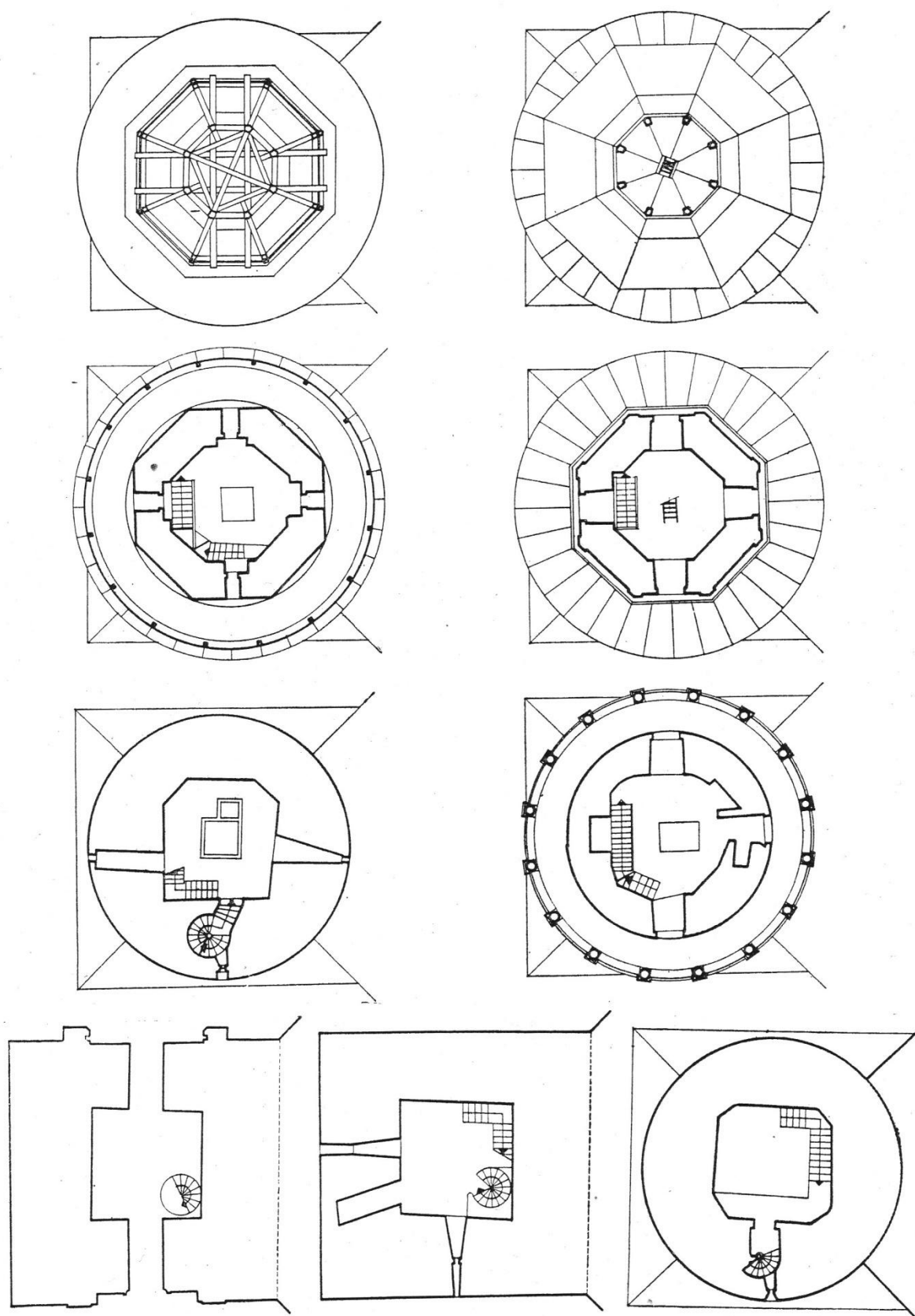
3.melléklet Lackner Kristóf: Sopron 1610 körül, rézmetszet



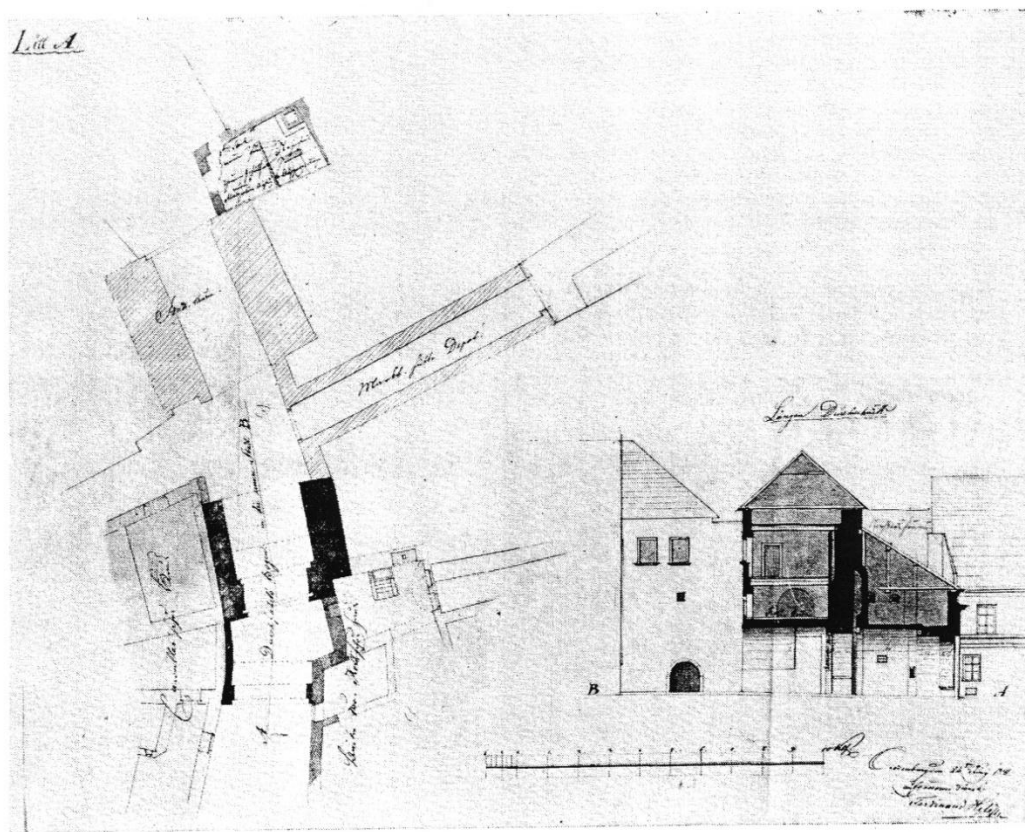
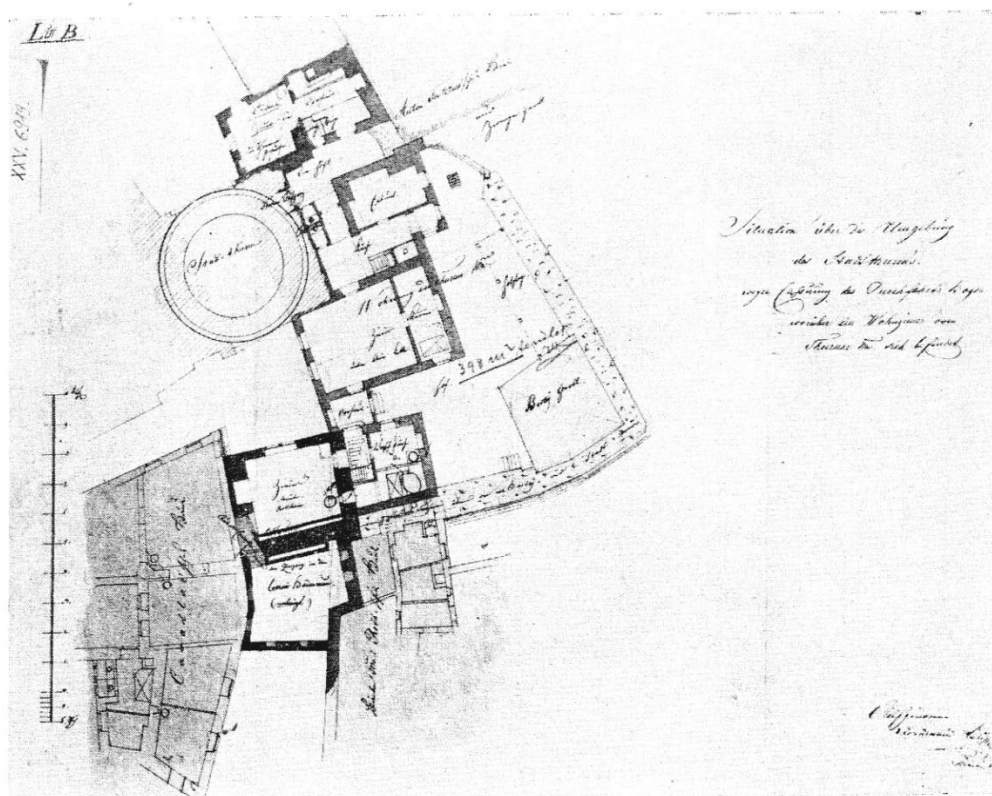
4. melléklet A Várostorony és környéke védelmi rendszere és a Fő tér északi házsora 1450 körül (Sedlmayer János elméleti rekonstrukciója, 2004.



5. melléklet Rudolphus Odor: A Tűztorony (1833.) papír, toll, akvarell



6. melléklet: A Tűztorony különböző szintjeinek alaprajzai (1952.-es felmérés)



7. és 8. melléklet Kaputornyok felmérési rajza 1841. (emelet és földszint, metszet) (forrás: Holl)



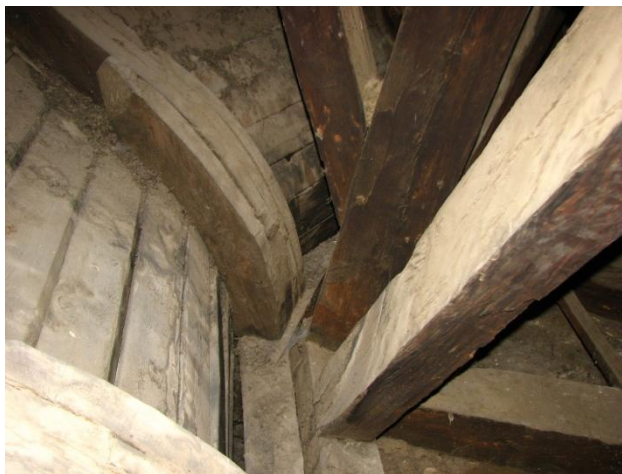
9. melléklet A régi városháza és Tűztorony 1890 körül (forrás: Soproni szemle)



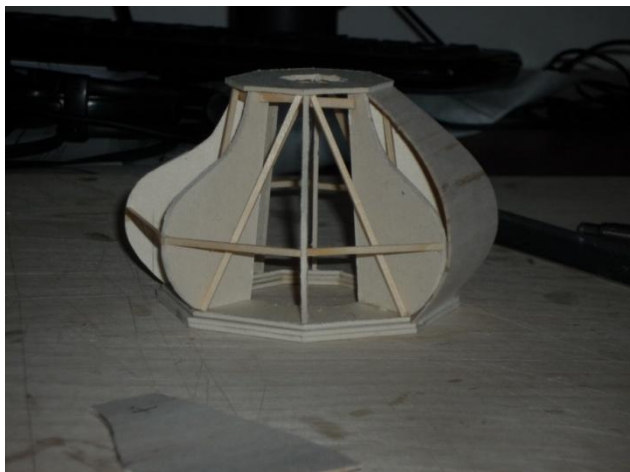
10. melléklet Terv 1895 körül a városháza környékének átalakítására (forrás: Soproni szemle)



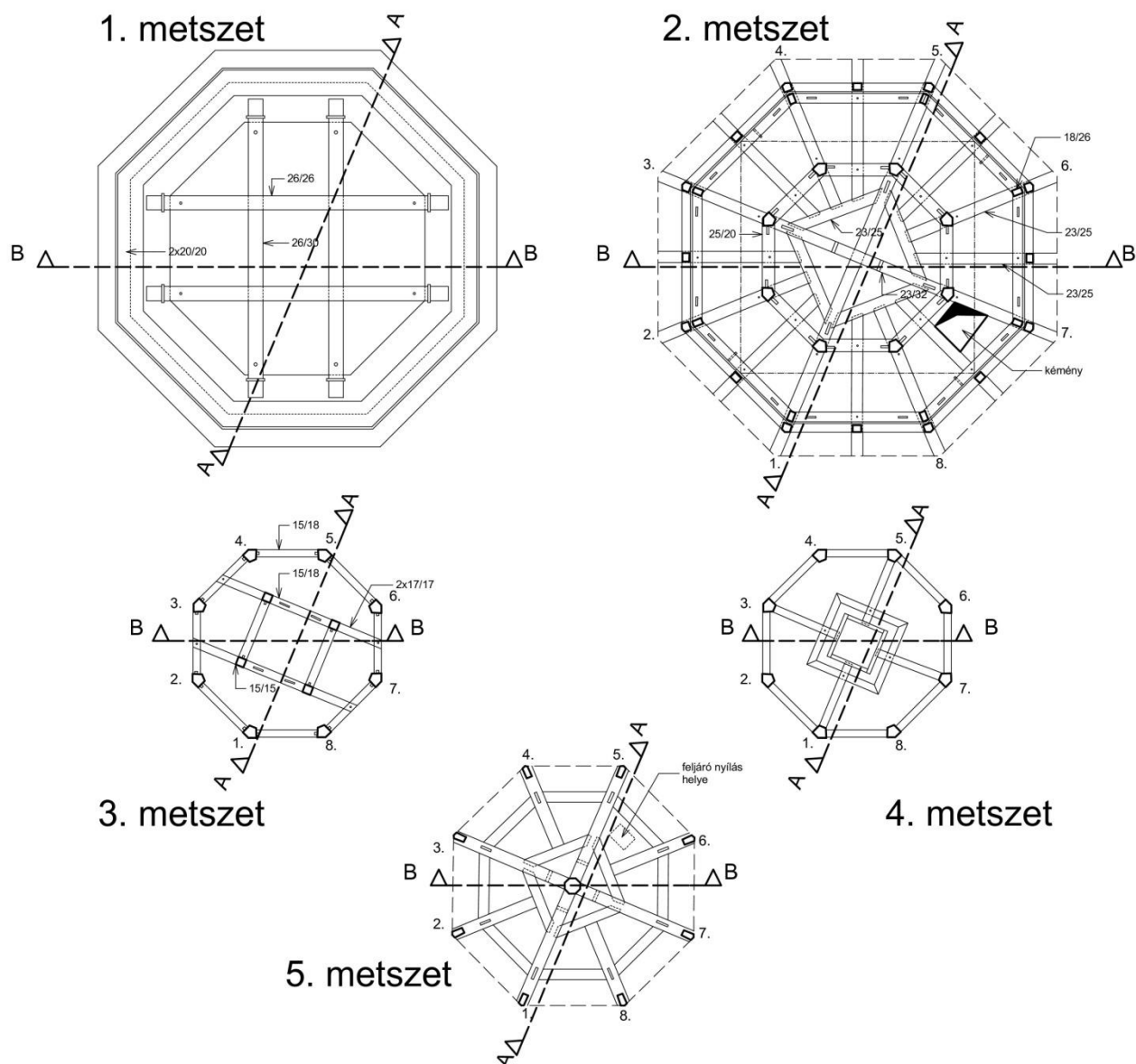
11. melléklet A tűztorony eredeti kapuval, mellette a toronyőr kétemeletes lakása (forrás: Soproni szemle)



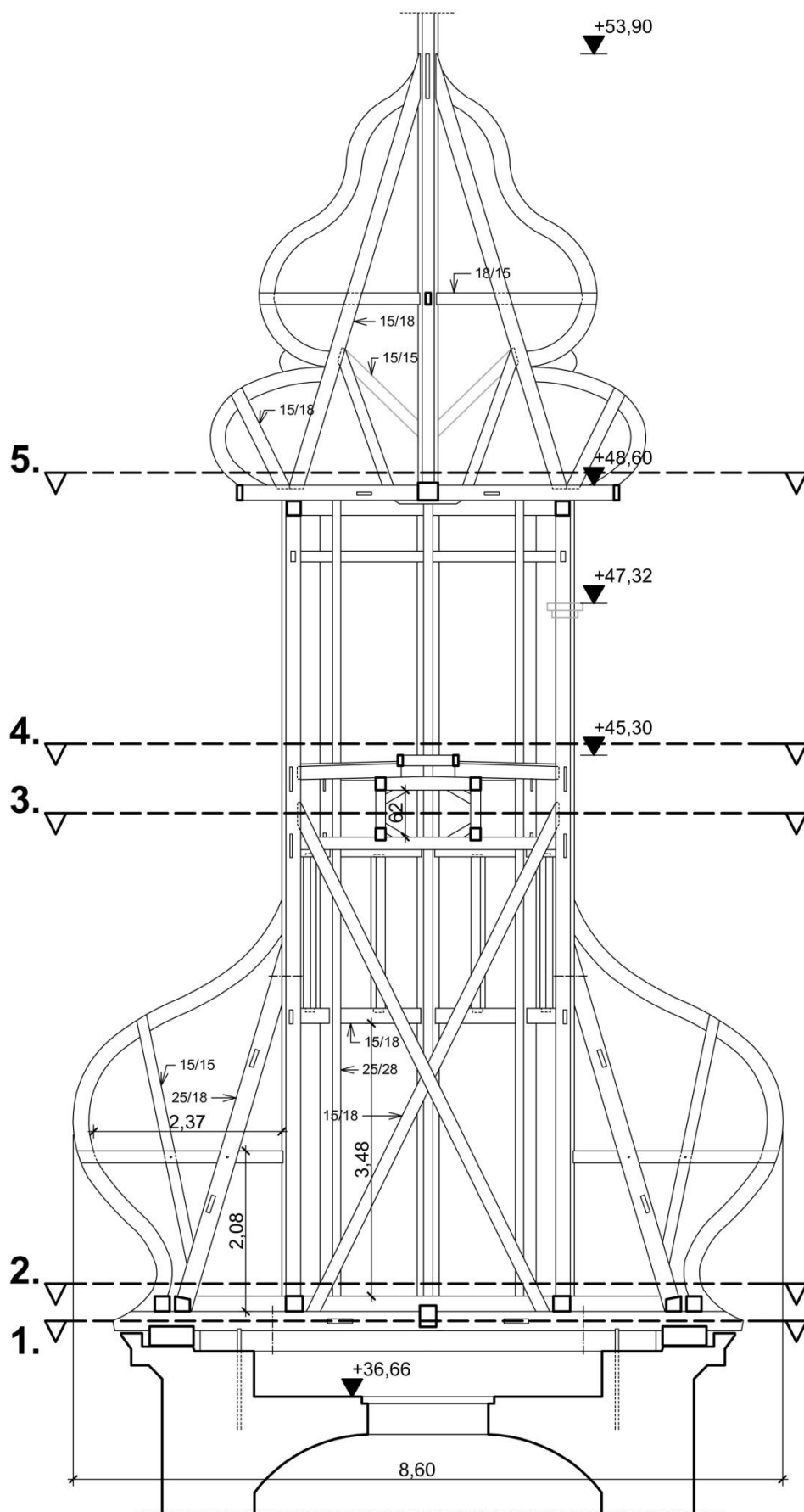
12.-15. mellékletek Helyszíni fotók (2011. augusztus)



16.-19. mellékletek Makettkészítés közben készült fotók

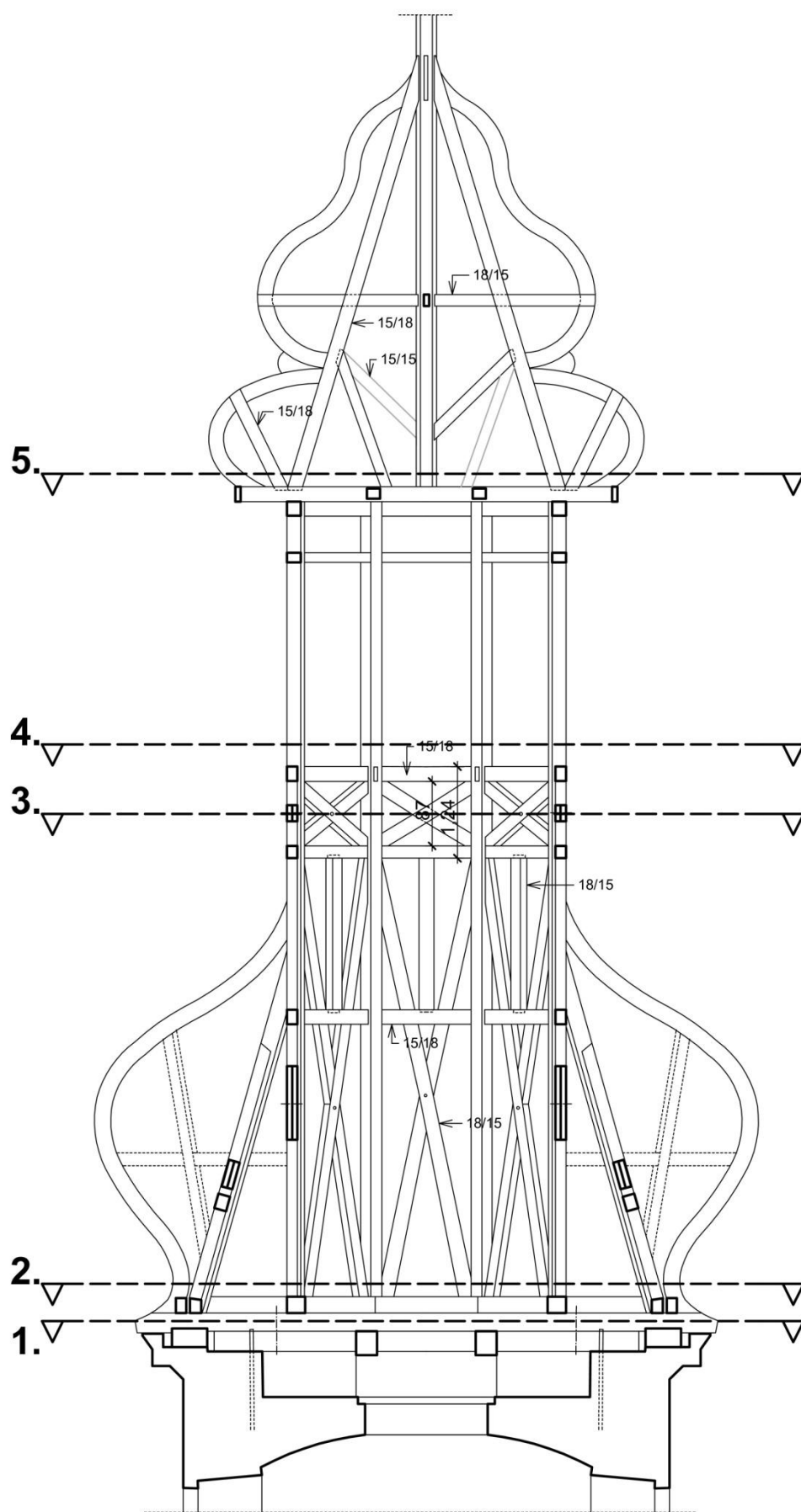


20. melléklet A toronysisak felmérési rajzainak pontosított vízszintes metszetei



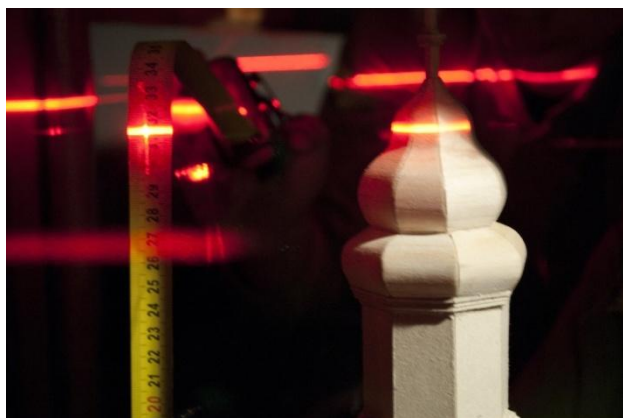
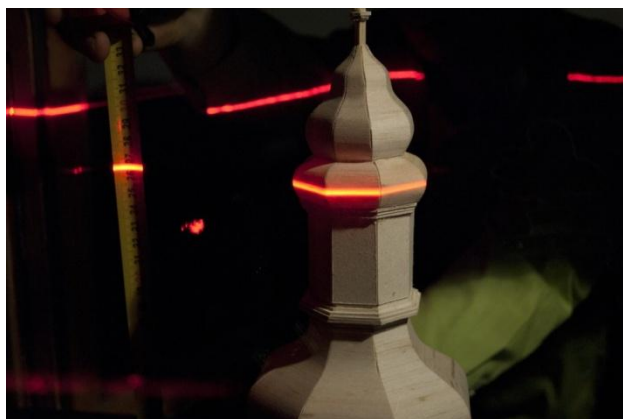
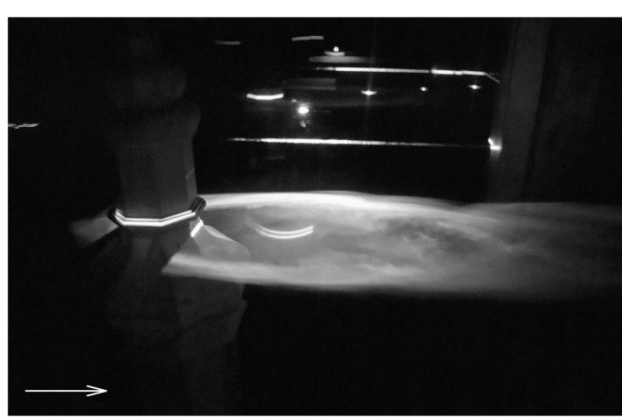
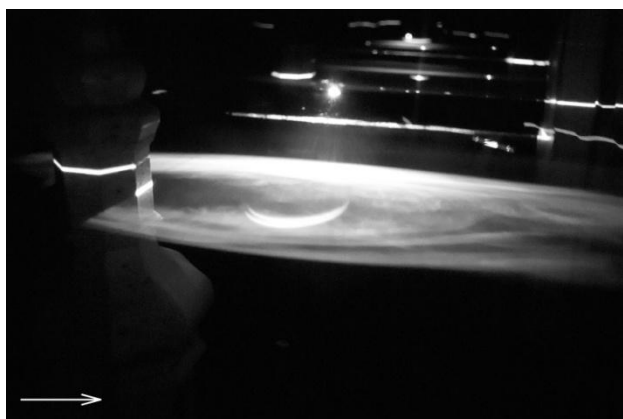
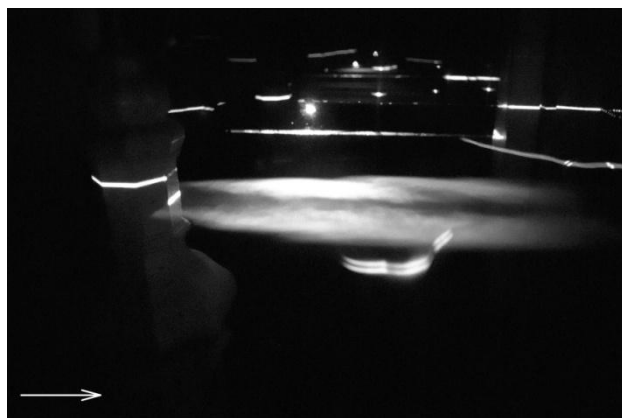
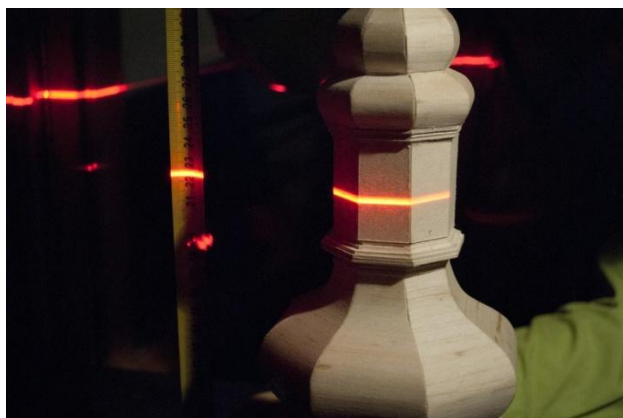
A-A metszet

21.melléklet A
toronysisak
pontosított A-A
metszete



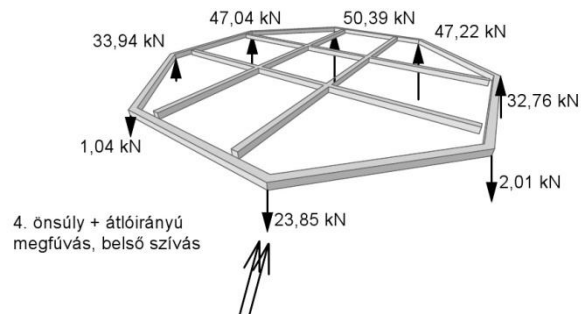
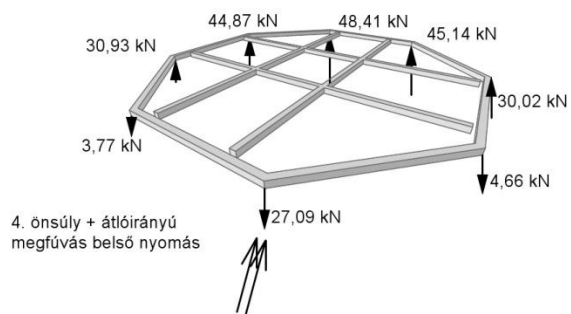
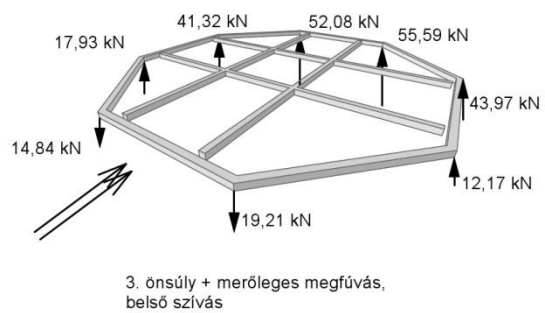
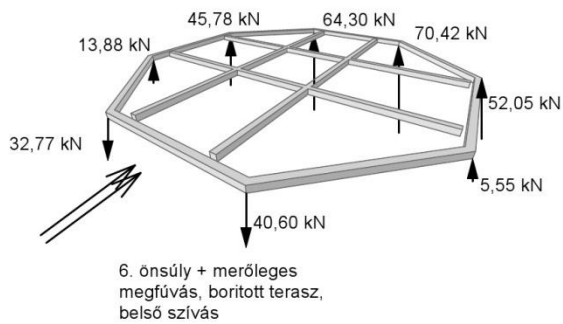
B-B metszet

22.melléklet A
toronysisak
pontosított B-B
metszete





23-31. mellékletek A Tűztorony makettje körül kialakuló légáramlások vizualizálása során készített fényképek



32-35. mellékletek: Támaszerők a különböző teherkombinációk esetén