

## Zárójelentés

A kutatás kezdetén felmértük a polimer kompozitok fajtáit és az alkalmazott gyártási eljárásokat. Mindezt annak érdekében tettük, hogy a kapott eredmények alkalmazhatósági határait kijelölhessük. Mint az eredeti tervben szerepelt, a textil-kompozitok tanulmányozását tűztük ki célul. A textil-kompozitoknál az erősítő anyag szövött hosszú szálak formájában van a mátrixba ágyazva. A szövésre általában az a jellemző, hogy a szálak egymásra merőlegesen futnak. A két, egymásra merőleges irányban a szálsűrűség sok esetben különböző. Azt az irányt, amelyikben nagyobb a szálsűrűség, domináns száliránynak (1. anyagi főiránynak), a rá merőleges irányt pedig, keresztiránynak (2. anyagi főiránynak) nevezzük. A szövéstípusok közül a *kísérleti vizsgálatokhoz* a keresztiszövésű textilkompozitot választottuk, de a kidolgozott *számítási modell* bármely szövéstípusra alkalmazható.

A gyártási eljárások közül a leggyakrabban alkalmazottat, a preimpregnált szövetből történő gyártást választottuk. Ennél a gyártás kiinduló anyaga, előgyártmánya a műgyantával előzetesen impregnált erősítő szövet. Az előzetes impregnálás úgy történik, hogy az erősítő szövet szálnyalábait a folyékony műgyanta fürdőn áthúzzák, majd lehűtik. A hűtésnél a műgyanta a szálnyalábokra dermed. A megfelelő méretre darabolt előgyártmányt (prepeget) egy merev (acél) sajtolószerszámba helyezik és nyomás alkalmazása mellett hőkezeléssel kikeményítik. A technológia során az alkalmazott nyomás és hőkezelés minimális és maximális értékét a mátrix és a szövet anyaga, más szóval az előgyártmány határozza meg. Ugyanis ha az előírtnál kisebb ez az érték, a szál és a mátrix együttdolgozása nem valósul meg, ha pedig nagyobb a mátrix „megsül”, anyagában nem kívánatos anyagszerkezeti változás jön létre. A két határ közötti értékek viszont a kompozitanyag száltérfogat arányát határozzák meg, hiszen az alkalmazott nyomás mellett a „felesleges” mátrixanyag eltávozik a rétegek közül, a szálanyag pedig ott marad. Ebből következően az alkalmazott gyártási nyomást nem kell anyagtulajdonságot meghatározó jellemzőnek tekinteni, helyette elegendő az adott nyomás következtében létrejövő kompozit száltérfogat arányt az egyik anyagtulajdonságot meghatározó tényezőnek figyelembe venni.

A gyártás során a kompozit lemezt úgy hozzák létre, hogy több preimpregnált réteget helyeznek egymásra úgy, hogy ezek anyagi főirányai eltérőek. Ha ismert egy-egy réteg valamennyi anyagtulajdonsága, akkor az ismert klasszikus rétegezési elmélet segítségével az egyes rétegek geometriájának és anyagjellemzőinek ismeretében az egész kompozit anyag mechanikai viselkedése számítható, vagy makroszkópikus anyagjellemzői meghatározhatók. Erre vonatkozó számításokat korábban, és ezen kutatás során is végeztünk és publikáltunk. A problémát mindig az egy réteg anyagtulajdonságainak az ismerete jelenti. Ezért volt szükséges ezzel a kérdéssel foglalkozni.

A mérnöki feladatok többségénél a textil-kompozit anyagszerkezet viselkedése makroszkópikus modellezéssel kielégítő pontossággal leírható. A makroszkópikus anyagmodell nem alkalmas a szálakban (részecskékben), vagy a mátrix anyagban fellépő mechanikai jellemzők (feszültségek, alakváltozások, stb.) meghatározására, hanem csak az anyag egy olyan kisebb tartományának átlagos jellemzői határozhatók meg vele, amelyben elegendően sok szál van.

A textilkompozit szerkezetek lemezszerkezetek. Ezekre az ortotróp anyagtörvényt négy anyagállandó, a két anyagi főirányban értelmezett rugalmassági modulusok, a csúsztató rugalmassági modulus és a Poisson tényező határozzák meg. Vizsgálataink célja éppen ezeknek az egy rétegre vonatkozó állandóknak a meghatározása a mátrix és a szál anyagtulajdonságainak az ismeretében.

Felmértük és összehasonlítottuk a különböző ún. keverési szabályokkal meghatározható anyagállandókat. Ezek egyirányú szálerősítés esetén jól használhatók, mivel tulajdonképpen párhuzamosan kapcsolt rugóként modellezik a rendszert. A textil kompozit lemez makroszkópikus anyagjellemzőit viszont két, egymásra merőlegesen egy irányban szálerősített réteg anyagállandóinak szuperpozíciójaként határozzák meg. Ezek elvi háttere már közel sem annyira igazolható. Kutatásunk során az ismert keverési szabályok helyett egy pontosabb, elviekben megalapozott és kísérletileg alátámasztott számítási módszert dolgoztunk ki.

### **A vizsgálati módszerek**

A kutatómunka során három irányból közelítve oldottuk meg a problémát:

- Az egyik olyan megbízható kísérleti módszerek kidolgozása és alkalmazása (alkalmazhatóságának bizonyítása), amelyekkel textil-kompozit rétegek anyagi viselkedése jellemezhető.
- A másik cél olyan numerikus eljárásokon alapuló végeelem modellek (végeelem modell-cellák) kidolgozása, amelyek felhasználásával a kompozit rétegek ortotróp anyagállandói jó közelítéssel előállíthatók a mátrix és a textil anyagállandóinak ismeretében.
- A kidolgozott modell-cellákkal kapott makroszkópikus anyagjellemzőket mérési eredményekkel és a keverési szabállyal kapott értékekkel összehasonlítva kapunk újmutatást a modell-cellák, valamint a kísérleti módszerek megbízható alkalmazhatóságára vonatkozóan.

A kísérleti vizsgálataink során, a szilárdsági anyagjellemzők modellezésén túl, a kompozit anyag lengéscsillapítással kapcsolatos tulajdonságaival is foglalkoztunk. Az eredményeinket publikáltuk.

### **Kísérleti eredmények**

A kísérlet megtervezésének folyamatában – a szerkezet és a gyártási technológia elemzése eredményeképpen – eldöntöttük, hogy a vizsgált jellemzőket meghatározó két legjelentősebb változó

- a textil-szövet hosszirányú szálainak és a teljes szálmennyiségnek a térfogati aránya, és
- a szál/kompozit térfogatarány.

Ez után u.n. Box-Wilson kísérleti tervet készítettünk, amelyben megadtuk az a tartományt, amelyben az eredményeink érvényesek lesznek. Már itt meghatároztuk a kiértékelés módszerét is. A kísérleti tervnek megfelelően legyártattuk az első ötven darab próbatestet az előzőekben rögzített változók függvényében.

Több szokványos mérési módszer kipróbálása és eredménytelensége után arra kényszerültünk, hogy a kompozitok esetében is alkalmazható mérési és értékelési módszert dolgozzunk ki. Ennek eredményéről publikációkban szintén beszámoltunk. A kísérleti berendezés, a mérési és kiértékelési módszer kidolgozása után végrehajtottuk a méréseket, amelyeket speciális nyúlásmérési eljárással Instron szakítógépen végeztük. A mérési eredmények értékelése során ellentmondásokhoz jutottunk, amelyek feloldása érdekében elemeztük a legyártott próbatestek összetételét. Ezt úgy végeztük, hogy – a próbatestek méretfelvétele után - vegyi úton kioldottuk a kompozitból a mátrix anyagot, így konkrétan mérhetővé vált egyrészt a szál/kompozit térfogatarány, másrészt viszont az 1. anyagi főirányban lévő száltérfogat és a teljes száltérfogat aránya, azaz a beállított, az anyag tulajdonságot meghatározó változók megvalósított értéke. Sajnálattal kellett tapasztalnunk, hogy a második változó előírt és megvalósított értéke között jelentős különbség van. Ezért, hogy a próbatesteket hasznosítani tudjuk, a teljes kísérleti és értékelési tervet át kellett dolgozni.

A mérések végrehajtása és értékelése után az alábbi általános következtetéseket fogalmaztuk meg:

- a kompozit jelleggörbéje bilineáris modellel közelíthető;
- a második szakasról visszaterhelve maradó alakváltozásokat észlelhetünk;
- a kompozit anyag ridegen törik;
- az első és második szakasz mereksége nem különbözik jelentősen.

A konkrét, a keresett jellemzőkre vonatkozóan pedig az alábbi eredményekről számolhatunk be.

A szál/kompozit térfogatarányt 0,25 és 0,40, az 1. anyagi főirányban lévő száltérfogat és a teljes száltérfogat arányát pedig 0,4 és 0,55 érték között vizsgáltuk.

Ebben a tartományban a vizsgálati paramétereket a változóban lineáris függvénnyel közelítettük, a függvényeket meghatároztuk. A függvényeket a legkisebb négyzetek elve alapján illesztettük.

Meghatároztuk a mérések, valamint a függvényillesztés hibáját, ami a teljes tartományban 6,5%-on belül maradt.

A kijelölt tartományban a Poisson tényező értéke 0,1 és 0,2 között, azaz kétszeresére változott, a rugalmassági modulus és a szakítószilárdság pedig 2,4-szeresére.

Az eredményeket részleteiben publikáltuk.

A csillapítási tényező meghatározása érdekében minden próbatestet befogtunk és felvettük a kilengési görbéjét. Mindezt minden próbatesten tömeg nélkül, és a végére helyezett két különböző tömeggel ötszörös ismétléssel végeztük. A kiértékelést a szokásos módon kezdtük: exponenciális burkológörbét illesztettünk a kirezgési görbére, majd ennek kitévőjéből a csillapítási tényezőt meghatároztuk, feltételezve, hogy a sebességtől lineárisan függ a csillapító erő. Azt tapasztaltuk, hogy az így meghatározott csillapítási tényező ugyanazon próbatest két mérési esetében jelentősen különbözött egymástól. *Megállapítható tehát, hogy a vizsgált kompozitok belső csillapítása nem lineáris függvénye a sebességnek.* Ezért először az eredményekből a kompozit belső csillapításának jellegét kellett meghatároznunk. Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy a kompozit lemezek belső csillapítása száraz csillapítás jellegű, azaz a Coulomb súrlódásból adódik. A csillapítás mértékének jellemzésére és annak különböző paraméterektől való függésének megítélésé-

re bevezettünk egy anyagtól és szerkezeti kialakítástól függő tényezőt, a csillapító erő és maximális visszatérítő erő viszonyát. Ez a szerkezet csillapítására jellemző mennyiség.

## Numerikus eredmények

Egy kompozit réteg anyagjellemzőinek meghatározására szolgáló számításokat a keverési szabályokkal kapott eredményeknek egymással és a mérési eredményekkel való összevetésével kezdtük. Mivel itt jelentős különbséget tapasztaltunk síkbeli VEM számítást végeztünk a mátrixot négy csomópontú héjelemmel, a szálat térbeli rúdelemmel modellezve. Az így kapott eredményeket is összevetettük a keverési szabállyal kapott eredményekkel és megállapítottuk, hogy milyen változók mellett elfogadhatók az egyezések. Az eredményeket publikáltuk.

Mivel a modell nem adott elegendően nagy tartományban kielégítő pontossággal használható eredményt, egy új eljárást dolgoztunk ki. Ez az új eljárás a textil-kompozit réteg makroszkópikus anyagjellemzőinek a textil-kompozit „mezo” szerkezetére alapozott modell-cellákon végzett numerikus modellel (végelem számításokkal) történő meghatározása. A numerikus vizsgálatokhoz az első lépésben azt kellett meghatározni, hogy mit tekintünk modell-cellának, ez milyen geometriai és anyagjellemzőkkel rendelkezik, és ezt a modell-cellát milyen végelem modellezéssel vizsgálhatjuk.

A végelem modell-cellák felépítéséhez az alábbi „bemenő adatok” ismeretére van szükség:

- a modell-cella síkbeli méreteire,
- a szálnyalábok keresztmetszeti méreteire és sűrűségére,
- a modell-cella vastagsági méretére,
- a szálnyalábok és a mátrix anyagjellemzőire,
- a modell-cella terhelésére és a geometriai peremfeltételeinek megadására, amelyek szilárdságtani alapkísérleteket szimulálják.

A keresztszövésnek nincs szimmetriája, ezért a modell-cella méretét úgy határoztuk meg, hogy a cella vízszintes és függőleges ismétlésével a szövet felépíthető legyen. A kísérleteknél alkalmazott hétrétegű próbatestek átlagos vastagsága 1,4 mm volt, ezért egy kompozit réteget 0,2 mm vastagúnak tekintettünk. Így az egyrétegű modell-cella befoglaló mérete  $4 \times 4 \times 0,2$  mm-re adódott.

A szálnyalábok keresztmetszeti méreteit 46 véletlenszerűen kiválasztott helyen mikroszkóp alatti mérésekkel határoztuk meg. A modell-cellán belül alkalmazott méretek ezeknek a mért értékeknek az átlagai. A szálnyalábok keresztmetszetének területe állandó, 0,1 mm-re vettük fel. Feltételeztük, hogy a 0,1 mm vastagságú szövet a 0,2 mm vastagságú műanyag réteg közepén helyezkedik el, ugyanakkor a szálnyalábok térbeli elhelyezkedésük, a kiválasztott szövetmintának megfelelően egymás alatt, ill. futnak. A kompozit anyag erősítő szövete S-üvegből készült, a mátrix anyaga pedig epoxi műgyanta, de természetesen ez könnyen változtatható.

A szálnyaláb-modell keresztmetszetét az eredeti nyalábot felépítő szálak keresztmetszetének összegével egyezőnek vettük fel és a szálnyaláb rugalmassági modulusát az azt felépítő üvegszálak rugalmassági modulusával megegyezőnek tekintettük. Az egyrétegű modell-cella 3D végelem közelítéssel történő modellezésénél a textilt és a mátrixot is négy csomópontú tetraéder elemekre bontottuk fel. Térbeli

modellezésnél a csomópontoknak három szabadságfoka van: az  $x$ ,  $y$ ,  $z$  irányú elmozdulások. Feltételeztük, hogy a szál-szál és a szál-mátrix érintkezési felületein tökéletes tapadás, együttdolgozás van. A terhelést úgy vettük fel, hogy azzal a szilárdságtan alapkísérleteit szimuláltuk. Így egy anizotróp térbeli modellhez jutottunk.

A modell-cellákkal végzett numerikus szimulációk eredményeit, valamint a keverési szabályokkal kapott eredményeket összehasonlítottuk. Azt tapasztaltuk, hogy a keverési szabályokkal előállított eredményekben nincs túlzottan nagy eltérés. A legnagyobb különbség még a  $\nu_{21}$  Poisson tényezőben volt. Az egyrétegű 3D modell-cellával előállított anyagállandók a keverési szabályokkal kapottaktól jelentősen eltérnek. A numerikus számításnál felvett szám adatok alapján meghatároztuk az ezekhez tartozó, a kísérleti vizsgálatoknál bevezetett dimenzió nélküli jellemzőket. Az ezekhez a jellemzőkhöz tartozó mérési eredményeket a meghatározott függvényekből kiszámítottuk. Ezt és a numerikus eredményt összevetve feltűnően jó egyezés adódott. Példaként bemutatva, míg az 1. anyagi főirányban a módosított keverési szabállyal kapott eredmény 24840 MPa, a bemutatott numerikus eredmény 30400 MPa, az általunk meghatározott empirikus függvényből kapott eredmény  $32400 \pm 2100$  MPa.

Mindebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a kialakított numerikus eljárás jól modellezi a valóságot és az adott, az előzőekben részletezett feltételek között jól alkalmazható.