

## A KÍSÉRLETI MODÁLIS ELEMZÉS ALKALMAZÁSA SZÁLERŐSÍTÉSŰ KOMPOZITOK KÁROSODÁSAINAK VIZSGÁLATÁHOZ

**Saad Alsarayefi**

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [machsa@uni-miskolc.hu](mailto:machsa@uni-miskolc.hu)

**Jálics Károly**

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [machijk@uni-miskolc.hu](mailto:machijk@uni-miskolc.hu)

### **Absztrakt**

*A kompozit anyagok károsodásának észlelése rendkívül fontos azok alkalmazása szempontjából. A cikk megvizsgálja a kísérleti modális elemzési módszer alkalmazását a károsodás jelenlétének kimutatására az szálerősített kompozit anyagú (FRP) próbatesten. A tanulmány célja a sérülések felderítésének, azok hatékonyságának vizsgálata a sérült és nem sérült üvegszállal erősített polimer, egyszerű geometriájú próbatestek zaj, rezgés (NVH) viselkedésének vizsgálatával. A próbatestben mesterségesen előidézett hiba a dinamikus paraméterek, például a sajátfrekvenciák, változását okozzák. Az eredmények azt mutatják, hogy az alkatrész NVH tulajdonságai megváltoztak a károsodások során, ami a kísérleti modális elemzés érzékenységét mutatja meg a károsodás szempontjából.*

**Kulcsszavak:** kompozit, károsodás, modális elemzés, sajátfrekvencia

### **Abstract**

*Detecting damage in composite materials is significantly important for the utilization of them. The paper investigates the use of the experimental part of modal analysis method to indicate damage presence in FRP specimen. The study goal is to examine the efficiency of the method to detect damage by investigating the noise, vibration and harshness (NVH) behaviour of damaged and undamaged fiber glass reinforced polymer specimen with simple geometry. A defect is generated artificially in the test specimen in order to visualize the difference in the dynamic parameters such as natural frequencies, modal damping, and mode shapes between the damaged and undamaged one. The results reveal the change of the NVH characteristics of the part during the damages leading to show the sensitivity of the experimental modal analysis for damages.*

**Keywords:** composite, damage, modal analysis, natural frequency

### **1. Bevezetés**

A kompozit anyagok alkalmazása az utóbbi években figyelemreméltóan növekszik. A kompozit anyagok fő előnyei, pl. nagy szilárdság és fajlagos merevsége miatt a szálerősítésű kompozitokat (Fibre Reinforced Polymer = FRP) széles körben használják a repülőgép- és járműiparban. Az alkalmazás során a kompozit alkatrészek károsodhatnak, amelyek sokszor nem láthatók az alkatrész felületén, és

az alkatrész váratlan meghibásodásához vezethetnek. A fent említett pontok miatt a szerkezet állapotfigyelése létfontosságúvá válik a kompozit alkatrészek vagy szerkezetek szempontjából. A kompozit alkatrészek sérüléseinek, károsodásainak megbízható és költséghatékony detektálása kritikus tényező az ebből készült alkatrészek optimális alkalmazhatósága szempontjából.

Az ilyen anyagok akusztikai viselkedését tekintve azt vizsgáljuk, hogy a kísérleti modális elemzés módszere képes-e leírni az anyag akusztikai tulajdonságainak azon változásait, amelyeket az FRP komponens bizonyos károsodásai (például szálak törése vagy mátrix repedése) okoznak.

A kísérleti modális elemzés egy olyan módszer, amely leírja egy szerkezet szerkezetdinamikai jellemzőit azáltal, hogy megadja a sajátfrekvenciákat, az sajátrezgéseképeket és a modális csillapítást, ahol ezek a paraméterek többé-kevésbé felelősek a szerkezet dinamikai/akusztikai viselkedéséért. Ehhez készítettünk egy egyszerű geometriájú, 20 próbatestből álló mintát, amelyek méréséből akár statisztikai következtetéseket is le lehet vonni. Kidolgoztunk egy eljárást, amivel a próbatesteken megfelelő méretű károsodást hozhatunk létre. Miután megkaptuk a modális elemzés eredményeit, elemeztük azokat, és megértettük a károsodott próbatest modális viselkedésének változását a sértetlen mintához képest. A vizsgálatok végén elemeztük a módszer alkalmazhatóságát és érzékenységét az FRP anyagok károsodásainak vizsgálatához.

## 2. A kompozit anyagok típusai

Mint az előző fejezetben említésre került, a repülőgépipar és a járműipar kis tömegű és jó mechanikai tulajdonságaik miatt széles körben használja a szálerősítésű polimer típusú kompozit anyagot. A kompozit anyagokat az erősítő anyagok és a mátrix anyagai szerint osztályozzuk. Az FRP általános összetétele: szál (szén, üveg stb.) és gyanta (polimer).

A szálak általános típusai [1]:

- Üveg: folyamatosan terhelve kúszhat és lúgos környezetben lebomlik.
- Szén: nagyon költséges lehet.
- Aramid: szívósság, ütésállóság.

A gyanta két kategóriába sorolható:

- Hőre keményedő gyanták: általános a szerkezeti felhasználásban. Ez a típus szobahőmérsékleten folyékony állapotban van, „edzés” után keményedik, és nem alakítható újra.
- Hőre lágyuló gyanták: Ez a gyanta szobahőmérsékleten szilárd anyag (újrahasznosított műanyag pellet), melegítés hatására folyékony halmazállapotba kerül, valamint ekkor nyomás alá helyezhető, hogy impregnálja az erősítőszálakat. Szükség esetén reformálható.

## 3. Kompozitok lehetséges károsodási formái

A kompozit anyagok károsodásának mechanizmusát az anyag jellege miatt nem könnyű előre megjósolni és megérteni. Hibák és törések általában a szerkezet gyártási folyamata, vagy üzemideje alatt fordulhatnak elő. A szálerősítésű kompozit károsodási mechanizmusai nagyjából a következő kategóriákba sorolhatók:

- Mikroszintű károsodás: Ez besorolható a szál és a mátrix szintjén levő károsodási mechanizmusokba. A szálak szempontjából számos károsodás fordul elő, mint például a szálak törése, kihajlása, hajlítása, felhasadása és radiális repedése. A mátrixszintű károsodási mechanizmus keretében számos típusú sérülést is ki lehet mutatni, például a mátrix-repedése, vagy a szálak és a mátrix közötti kapcsolódási felület törése.

- Makró szintű károsodás: A makroszintű mechanizmusok laminált szintű mechanizmusok. Látható, hogy a szomszédos rétegeket egy vékony gyantaréteg köti össze egymással. Ez az interfészréteg átviszi az elmozdulást és az erőt az egyik rétegről a másikra. Amikor ez az interfészréteg teljesen meggyengül vagy megsérül, akkor a szomszédos rétegek elválnak egymástól. Ezt a károsodás típusát delaminációnak, elválásnak nevezzük. Az elválás csökkenti az átvihető erőt és a merevséget, ezáltal korlátozza a szerkezet élettartamát. Továbbá feszültségkoncentrációt és helyi instabilitást okoz a teherhordó rétegekben, ami a delamináció további növekedéséhez vezet. Ebben a két esetben az elválás a szerkezeti terhelési útvonalak újraeloszlásához vezet, amely viszont a szerkezeti hibákat kelthet. Ezért az elválás közvetlenül befolyásolja a szerkezet végleges meghibásodását, ezáltal befolyásolja annak élettartamát. Ezért az elválás folyamata a legismertebb korlátozó tényező egy kompozit anyagból készült alkatrészrel kapcsolatban.
- Csatolt mikro-makró szintű hibamechanizmusok: A réteg keresztirányú mátrix-repedése fontos meghibásodási mechanizmus. Az átmenő vastagságú keresztirányú repedés átterjedhet a szomszédos rétegre, és ezzel törést okozhat [2].

#### 4. A vizsgált próbatetek

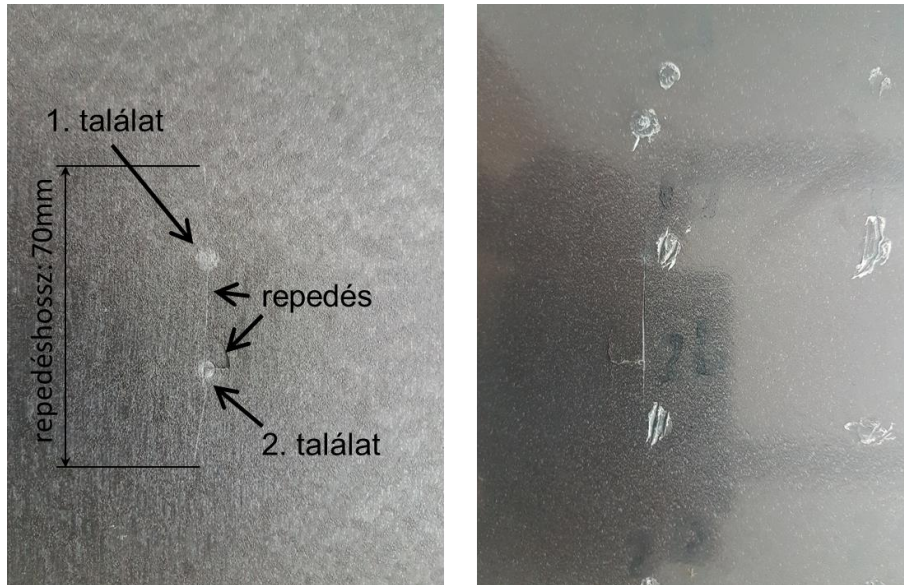
A vizsgálathoz üvegszállal erősített polimer lemezt használtunk. A lemez mérete 500x200x3 mm (1. ábra), és az anyaga MG GC 201 típusú (melamingyanta laminátum). Több rétegből melaminnal impregnált üvegszövetből készül. A réteg kiváló mechanikai és elektromos tulajdonságokkal rendelkezik a nemzetközi szabványok szerint. A rugalmassági modulus 14000 MPa, sűrűsége 1700 kg/m<sup>3</sup>.



1. ábra. Az egyik vizsgált próbatest

#### 5. A próbatetek károsodásának létrehozása

Számos kísérlet történt a próbatestben repedés létrehozására. Először ejtési vizsgálatokat végeztünk, ahol csapágygolyók ejtettünk szabadeséssel 8,5 m magasról. Az első esetben, amikor a golyó tömege 20 g volt, a kinetikus energia körülbelül 1,7 J-ra adódik. Ez nem volt elegendő a károsodáshoz létrehozásához. A golyótömeget 40 g-ig növeltük, tehát a kinetikus energia körülbelül 3,3 J volt, de ez is sikertelen próbálkozás volt. A golyó és a minta közötti érintkezési pont még csak nem is volt látható. A második kísérletsorozatban egy Diana 300R cal.177 típusú légfegyvert alkalmaztunk a károsodás létrehozására. A légfegyver maximális kinetikus energiája 7,5 J a csőtorkolaton, és egy 0,53 g tömegű ólomlövedéket lő ki 170 m/s sebességgel. Különböző távolságoktól (7,5 m, 5 m és 2,5 m) leadott lövések után kicsi kb. 4 mm átmérőjű foltot észleltünk a lemezen, azok repedése nélkül. Végül, amikor a távolságot 1,5 m-re csökkentettük, a lemez megrepedt. Két lövést adtunk le ebből a távolságból; az első lövés csak egy kis foltot hozott létre (2. ábra balra: 1. találat), de a második lövés 70 mm-es hosszban elrepszettette a lemezt. Ezek után a károsodott lemezt használtuk fel a további vizsgálatokhoz.



2. ábra. A próbatest károsodása

## 6. A vizsgálati módszer

A kísérleti modális elemzés egy olyan eljárás, amelyet alkatrészek dinamikai jellemzőinek tanulmányozására használtak. Ezen kívül az utóbbi években alkalmazták a módszert alkatrészek teljesítményének értékelésére és hatékonyságvesztésének mérésére az esetleges károsodás következtében. Az ilyen tényezők előrehaladása fokozatosan megváltoztatja az anyag teljesítményét, ami megváltoztatja a variációs jellemzőket. Ilyen esetekben a sajátfrekvenciákat, a rezgéseképeket és a szerkezeti elemek csillapítási tulajdonságait vizsgáljuk. Ezeket a paramétereket modálisanalízis-teszteléssel lehet megadni. A kísérleti modális elemzésről bebizonyosodott, hogy alkalmazható helyszíni méréseknél és még nagy méretű alkatrészek esetén is.

Kétféle módszer használható a szerkezet gerjesztésére a modális elemzéshez. Nevezetesen, ez a két módszer a bemeneti-kimeneti (aktív gerjesztés) és csak a kimeneti (üzemi gerjesztés) módszer. A gerjesztő eszközök általában impulzus kalapács, eső súlyok, vagy elektrodinamikus rezgésgerjesztők stb. A modális elemzéshez használt gerjesztő hullámformák különböző természetűek lehetnek, beleértve a harmonikus és a véletlenszerű bemenetet, valamint az impulzusszerű gerjesztést is. A csak kimeneti módszernél gerjesztés akkor fordul elő, ha a szerkezet üzem közben működik és valamilyen gerjesztés, például pl. a hajtómotor, a járműforgalomból származó gerjesztés vagy szélterhelés hat rá.

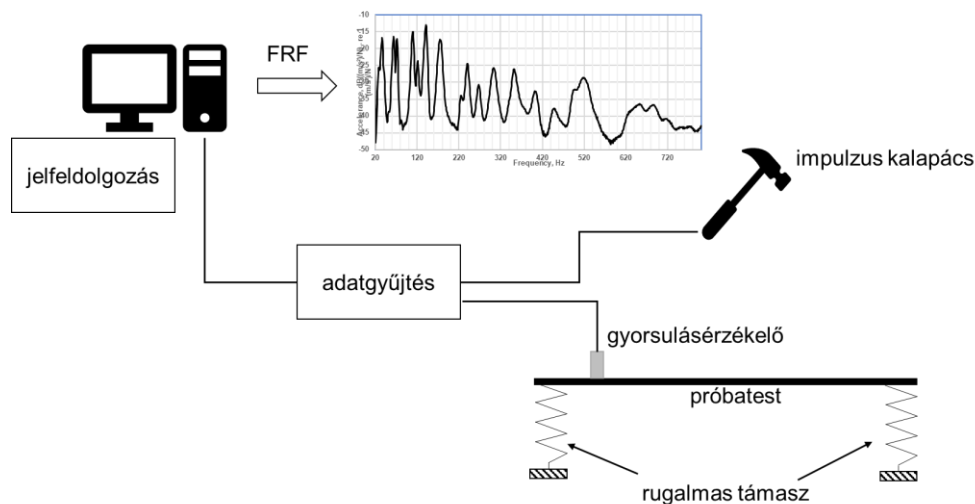
A teszt elvégzése során a dinamikai tulajdonságokat meghatározhatjuk több mozgásérzékelő (általában gyorsulásérzékelő) elhelyezésével a szerkezet előre meghatározott helyére. A teljes háromdimenziós rezgéskép felvételének megfelelően a triaxiális (háromtengelyű) gyorsulásérzékelőket általában előnyben részesítik. Az érzékelők több helyre történő elhelyezésének célja az, hogy elegendő mennyiségű frekvencia-válasz függvény (FRF) álljon rendelkezésre, hogy az egyes módusok a modális teszt alapján azonosíthatók legyenek. A nagyobb rendszámú sajátrezgéseképek értelmezhetősége függ a gyorsulásérzékelők optimális elhelyezésétől és számától; azaz a magasabb rendszámú módusok meghatározása nagyobb számú gyorsulásérzékelőt igényel [3].

A tesztek elvégzése előtt a lemezen összesen 30 mérési pontot definiáltunk azért, hogy ábrázolhassuk azokat a módusokat is, amelyek általában inkább lokális elmozdulásokat mutatnak, mint globálisakat. A 30 db mérési pont elegendőnek kell lennie ehhez. A pontok közötti távolság 50 mm volt a hosszabb oldal mentén és 75 mm a lemez rövidebb oldala mentén (3. ábra). A 30. sz. mérési pont egyidejűleg a gerjesztési pont is volt.



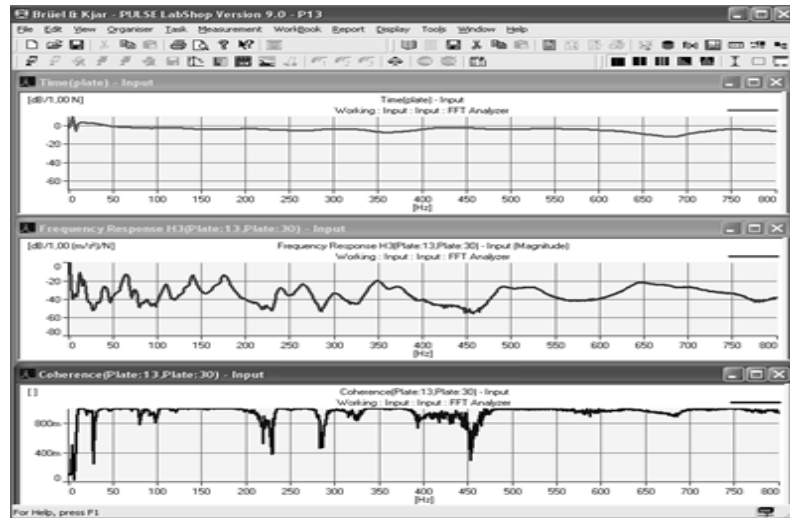
3. ábra. A mérési pontok helyzete a próbatesten

A mérésekhez a B&K Pulse mérőkeretet, a B&K Pulse Labshop, a B&K 4397 egytengelyű gyorsulásmérőt és az Endevco 2202-10 impulzuskalapácsot használtuk. Úgy döntöttünk, hogy rögzített gerjesztési pontot alkalmazunk (fixed hammer). A lemezt mindkét végén elasztikus, szivacsból készült tartókra fektettük, és az egyik mérési pontra egy gyorsulásérzékelőt helyeztünk. A mérési felépítés elvi vázlatát a 4. ábra mutatja.



4. ábra. Az alkalmazott mérési felépítés elvi vázlatja

Miután az impulzus kalapáccsal elvégeztünk 10 egymás utáni gerjesztést, a rögzített FRF-k átlagolására került sor. A méréseket megismételtük a fennmaradó mérési pontokra is. A teszt során ellenőriztük az FRF-ek, a koherenciák, a gerjesztés spektrumának és időjelének minőségét (például a kettős ütések elkerülése érdekében). Egy tipikus FRF, koherencia és autopower gerjesztési spektrumot a 5. ábra mutat a lemezre vonatkozóan. A mérések minősége megfelelőnek tűnik; a gerjesztés nem mutat szignifikáns szintcsökkenést a frekvencia függvényében, és a koherencia néhány antirezonancia-hely kivételével magas, megközelíti az 1-es értéket. Összesen 6 próbatesten hajtottuk végre a méréseket (beleértve a később károsodott próbatestet is). A cél az volt, hogy a rezonanciafrekvenciák szórását hasonló/ugyanazon próbatesten vizsgáljuk. Az FRF-k nem mutattak szignifikáns különbséget a rezonancia frekvenciák között.



5. ábra. A gerjesztés (felül), az átviteli függvény (középen) és a koherencia (alul) egy mérési pont esetén

Első pillantásra az átviteli függvények átlaga (6. ábra) nem látható szignifikáns különbség az FRF általános jellemzőiben. 550 Hz-től van némi különbség, de ez inkább a gyenge gerjesztési szintnek és az anyag nagy csillapításának köszönhető. Ezen a frekvencián túl az FRF-ekben nem található megkülönböztethető rezonancia.

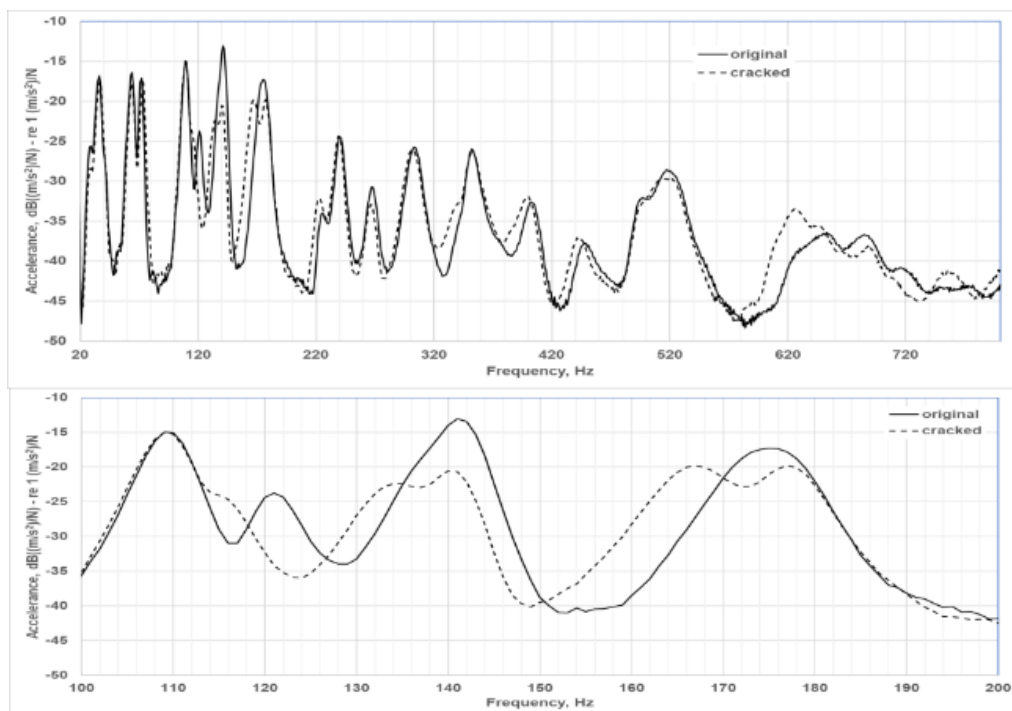
Figyelembe véve az egyedi rezonanciákat (kb. 20 darab 0 Hz és 500 Hz között) a 110 és 190 Hz közötti tartományban (6. ábra alul), a csúcsok szintjének különbségei figyelhető meg, valamint hiányzó új csúcsok találhatók összehasonlítva a repedt lemez átlagolt FRF-t a sérülésmentes lemez válaszfüggvényével. Megállapítható, hogy az anyagban keletkező repedés bizonyos rezonanciák megjelenését és eltűnését okozza. Feltehetően a módusok nem jelennek meg, ill. nem tűnnek el, mindig ott vannak, de a repedés miatt egyszerűen jobban vagy rosszabbul gerjeszthetők, a frekvenciától, a rezgésképtől és az anyagsillapítástól függően.

A teljes modális elemzés elvégzésével ezen feltételezés igazolható volt. Ez azt jelenti, hogy a rezonancia csúcsok jelentősen megváltoznak (megjelennek vagy eltűnnek), ahol megfigyelhető egy nagyméretű repedés körüli mérési pontok közötti nagy relatív elmozdulás. A sérült mintán a repedés körülbelül a 14.sz. mérési ponttól a 20. sz. mérési pontig terjed, és ezek között is nagy elmozdulás figyelhető meg. A 7. ábra két példát mutat a 132 Hz és 142 Hz közötti módusokra, ennek bizonyítékként.

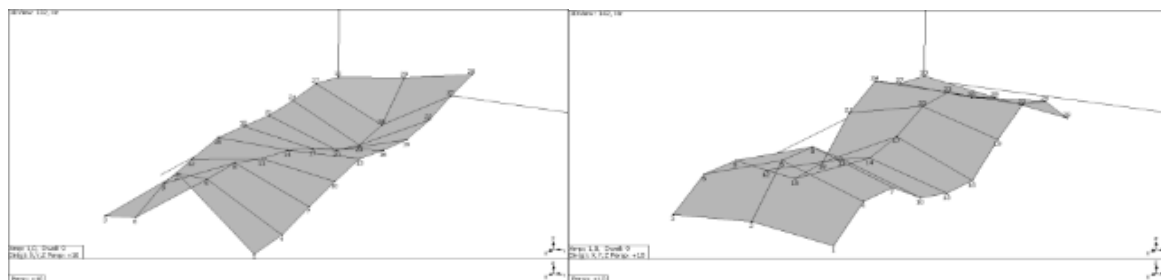
## 7. Összefoglalás

A vizsgálatokból kiderül, hogy a modális elemzés, ill. az átviteli függvények (FRF) segíthetnek észlelni egy repedést, károsodást az FRP anyagban. Ebben a vizsgálatban a módszer csak alacsony frekvenciatartományban működött. Könnyű rezgető gép segítségével ez a határ növelhető, ám a fokozatosan növekvő modális sűrűség miatt nehéz lesz a rezonanciák és módusok vizsgálata. Ebben az esetben, mivel ismert, hogy az anyagban repedés van, ezért a minta modális viselkedésében némi változás várható. Valójában egy viszonylag összetett alakú járműalkatrésznél más hatásokat kell mérlegelni, akár még az alkatrész nem megfelelő alátámasztása is változást okozhat a modális viselkedésében. A modális elemzés további vizsgálatokat igényel a repedések észlelése céljából az FRP-ben, de általában más típusú anyagok esetében is, tehát a tesztet többször meg kell ismételni annak érdekében, hogy megkap-

jük a módszer érzékenységét a külső hatásokra és a repedések kialakulására. Ez a vizsgálat később fogjuk elvégezni.



6. ábra. Az átviteli függvény a károsodás nélküli (folytonos vonal) és károsodott próbatesten (szaggatott vonal)



7. ábra. A károsodott próbatest sajátrezgésepei 132 Hz-en (bal) és 142 Hz-en (jobb)

## 8. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.



## Irodalom

- [1] Barbero, E.: Introduction to Composite Materials Design, New York: CRC Press, 2010.
- [2] Ghobadi, A.: Common Type of Damages in Composites and Their Inspections, World Journal of Mechanics (7): 24-33, 2017. <https://doi.org/10.4236/wjm.2017.72003>
- [3] Karbhari, V.M., Kaiser, Henning: Methods for Detecting Defects in Composite Rehabilitated Concrete Structures, Washington: Federal Highway Administration, 2005.
- [4] Ward, H., Lammens, S., Sas, P.: Modal Analysis Theory and Testing, Katholieke University Leuven, 1998.
- [5] Cremer, L., Heckl, M.: Structure -Born Sound, Berlin: Springer Verlag, 2005. <https://doi.org/10.1007/b137728>
- [6] Ewins, D.J.: Modal Testing: Theory, Practice and Application, Philadelphia: Research Studies Press, 2000.
- [7] Hajel, P., Soerio, F.J.: Structural damage detection based on static and modal analysis. AIAA Journal 28(6): 1110-1115, 1990. <https://doi.org/10.2514/3.25174>
- [8] Randall, R.B.: Frequency Analysis, Denmark: Brüel&Kjaer, 1987.
- [9] Alsarayefi, S.J., Jálícs, K.: The change of the NVH characteristics of composite vehicle components as a result of visible and not visible damages, Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III. CRC Press 2019.