

A GAMMA-SUGÁRZÁS HATÁSA KÜLÖNFÉLE ÍNAK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIRA – STATIKUS VIZSGÁLATOK

Faragó Dénes^{1,2}, Kiss Rita M.^{1,2}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Biomechanikai Kooperációs Kutatóközpont

rita.kiss@mogi.bme.hu

DOI: 10.17489/2021/2/01

Absztrakt

Az allográfok szerepe a szalagok pótlásában fokozatosan nő. Fontos kérdés azonban, hogy a sterilizáció és a tárolás hogyan befolyásolja a fizikai és a mechanikai tulajdonságokat. A mechanikai tulajdonságokat a statikus és dinamikus szakítóvizsgálatokkal különböző biomechanikai paraméterek, mint például húzó rugalmassági modulus, szakadási nyúlás, maximális erő határozható meg. Jelen kutatás célja annak elemzése, hogy 5 különböző fajta ín (Achilles, quadriceps, semitendinosus + gracilis - STG), tibialis anterior - TA, peroneus longus - PL) esetében a különböző sterilizációs módszerek (fagyasztás, fagyasztás + alacsony dózisú gamma sugárzás, fagyasztás + magas dózisú gamma sugárzás) hogyan változtatják meg a statikus mechanikai vizsgálatból kapott húzó rugalmassági modulus, maximális erő, nyúlás a maximális erőnél és a szakadási nyúlás értékeit, illetve korábbi dinamikus eredményekhez képest milyen eltérés figyelhető meg. A vizsgálatba 152 darab ínt vontunk be. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a dinamikus vizsgálat eredményei nem térnek el a statikus vizsgálat eredményeitől. Az eredmények azt is jól mutatják, hogy a magas dózisú gamma-sugárzás nem alkalmas a sterilizálásra, valamint az Achilles, a quadriceps és az STG ín típusokat nem célszerű a jövőben vizsgálni, mivel a mechanikai paraméterei a sterilizálás következtében szignifikánsan romlanak. Jelen vizsgálat eredményei alapján a sterilizálás a PL és TA ínak maximális erő és a rugalmassági modulus paramétereit változtatják meg a legkisebb mértékben.

Kulcsszavak: ínak, száraz jég, gamma-sugárzás, dinamikus, statikus, mechanikai vizsgálat

EFFECT OF GAMMA IRRADIATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF VARIOUS TENDONS - STATIC TESTS

Abstract

The role of allographs in the replacement of tapes is gradually increasing. However, an important question is how sterilization and storage affect physical and mechanical properties. Static and dynamic tensile tests can determine mechanical properties such as tensile modulus of elasticity, elongation at break, maximum force. The present research aims to analyze the difference between 5 different types of tendons (Achilles, quadriceps, semitendinosus + gracilis - STG, tibialis anterior - TA, peroneus longus - PL) in different sterilization methods (freezing, freezing + low dose gamma radiation, freezing + high dose gamma radiation), how the values of the tensile modulus of elasticity, maximum force, strain at break and strain at tensile strength obtained from the static mechanical test are changed and what

difference can be observed compared to previous dynamic results. 152 tendons were included in this study. Based on the results, it can be concluded that the results of the dynamic test do not differ from the results of the static analysis. The results also show well that high-dose gamma radiation is not suitable for sterilization, and that Achilles, quadriceps, and STG tendon types are not practical to investigate in the future because their mechanical parameters deteriorate significantly as a result of sterilization. Based on the results of the present study, sterilization changes the parameter of maximum force and modulus of elasticity of PL and TA to the smallest extent.

Keywords: tendon, dry ice, gamma irradiation, dynamic, static, mechanical test

Bevezetés

Az allográfok használata esetén elengedhetetlen a sterilizálás, azaz mélyfagyasztást utáni különböző dóziszú gamma-sugárzás. A 10-15 kGy dóziszú gamma-sugárzás baktericid hatású,¹ míg a 30-50 kGy dóziszú virucid hatású.^{2,3}

Az ínak mechanikai tulajdonságai dinamikus vagy statikus vizsgálattal határozhatók meg. A statikus vizsgálatok esetén az ínat, előterhelést követően, tönkremenetelig (szakadásig) terheljük egy előre beállított sebességgel. A dinamikus vizsgálat esetében a szövetet az előterhelést követően egy előre meghatározott terhelési tartományban egy megadott frekvencián ciklikusan egy adott ciklusszámig terheljük, majd a szakítóerőt a statikus vizsgálattal határozzuk meg. A statikus vizsgálat egyszerű és gyors, a szövet mechanikai tulajdonságai meghatározhatók. A dinamikus vizsgálat esetén elemezhető a ciklusszám hatása a mechanikai tulajdonságokra.

Korábbi tanulmányainkban dinamikus mechanikai vizsgálattal teszteltünk öt különböző ín fajtát (Achilles, quadriceps, semitendinosus+gracilis – STG, peroneus longus – PL, tibialis anterior – TA), amelyek alkalmasak lehetnek különböző szalagok pótlására.^{4,5} Az eddigi kutatások alapján^{4,5} 25 kGy dóziszú gamma-sterilizálás után a tibialis anterior (TA) (432,55 MPa) és a

peroneus longus (PL) (267,83 MPa) rugalmassági modulusa a legkedvezőbb, míg a legnagyobb szakítóerőket a TA (2552,1 N) és a PL esetében (2398,30 N) mértük. A maximális nyúlásértékek között eltérés nem volt megfigyelhető. A natív (kezeletlen) és a fagyasztott ínak mechanikai tulajdonságai között szignifikáns eltérés nem volt megfigyelhető, amely a tárolófolyadék összetételének köszönhető. (1. táblázat) A magas dóziszú gamma-sugárzás a baktériumok mellett a vírusokat is elpusztítja, de az ínak biomechanikai paramétereit lényegesen rontja.⁶ A mért értékek azonban a szükséges terhelési értékeket meghaladták. (303-355N).^{7,8}

Az irodalomban^{1-3,6-11} található statikus vizsgálatok eredményei alapján a következők állapíthatók meg:

- 15-25 kGy dóziszú gamma-sugárzással kezelt Achilles ín húzó rugalmassági modulusa 95,01 MPa, a szakadási nyúlása 21,98 %, míg a natív ínak esetén a húzó rugalmassági modulus 292,04 MPa, a szakadási nyúlás 22,55 % volt, azaz a gamma-sugárzás hatására a húzó rugalmassági modulus értéke szignifikánsan csökkent.^{1-3,6}
- 15-25 kGy dóziszú gamma-sugárzással kezelt PL ín esetén a maximális erő értékei 2091,6 N-ről 2122,8 N-ra emelkedett, míg a szakadási nyúlás értéke 43,6 %-ról 40,8 %-ra csökkent⁹, szignifikáns eltérés nem figyelhető meg.⁷⁻⁹

• Az STG esetében két különböző dózisu gamma-sugárzás hatását is vizsgálták a korábbi kutatások: 18,3-21,8 kGy gamma-sugárzás hatására a maximális erő 1380 N-ról

1010 N-ra csökkent, míg a húzó rugalmassági modulus értéke 322,38 MPa-ról 369,08 MPa-ra emelkedett. 24-28,5 kGy gamma-sugárzás hatására a maximális erő 1660 N-ról 1230 N-ra

		A csoport			B csoport		
		Medián	25%	75%	Medián	25%	75%
Achilles	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	128,18	101,41	173,13	163,08	147,12	190,39
	Maximális erő (N)	2312,08	1822,00	3122,77	2941,50	1902,00	3684,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,28	0,22	0,34	0,24	0,22	0,25
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,59	0,40	1,01	0,35	0,32	0,38
Quadriceps	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	191,31	138,13	292,42	260,23	146,95	377,55
	Maximális erő (N)	1939,75	1121,97	2727,15	2638,50	1490,00	3828,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1540	0,1340	0,2485	0,1290	0,1040	0,1340
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,3370	0,2766	0,6090	0,2550	0,2060	0,3220
Semitendinosus + gracilis	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	186,46	142,82	229,26	198,92	136,92	244,52
	Maximális erő (N)	1922,96	1501,00	2374,84	2052,00	142,01	2525,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1300	0,0980	0,1864	0,1230	0,1080	0,1660
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,2460	0,1500	0,2850	0,2450	0,1700	0,2740
Tibialis anterior	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	343,24	308,25	383,33	513,54	438,52	553,45
	Maximális erő (N)	2582,22	2236,38	2784,23	3132,50	2675,00	3376,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1041	0,0831	0,1543	0,1360	0,1100	0,1780
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1580	0,1099	0,2131	0,2400	0,2340	0,3000
Peroneus longus	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	250,33	166,58	309,85	237,91	193,87	273,30
	Maximális erő (N)	2490,82	1657,51	3083,02	2522,50	2055,00	2897,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1402	0,1049	0,1790	0,1470	0,1280	0,1720
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1947	0,1266	0,4440	0,2630	0,2460	0,2700

		C csoport			D csoport		
		Medián	25%	75%	Medián	25%	75%
Achilles	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	157,62	9,00	186,47	79,53	16,82	158,58
	Maximális erő (N)	3178,97	2698,39	3741,47	3439,30	3137,31	4009,34
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,22	0,17	0,25	0,27	0,23	0,33
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,44	0,37	0,52	0,46	0,40	0,52
Quadriceps	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	120,24	90,13	299,29	83,20	30,65	137,05
	Maximális erő (N)	2803,68	1653,26	3591,97	2564,77	1835,38	3265,92
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1841	0,1467	0,2299	0,2729	0,1949	0,3472
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,3231	0,2481	0,4885	0,4392	0,3574	0,5909
Semitendinosus + gracilis	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	240,28	187,08	264,11	222,66	128,59	335,73
	Maximális erő (N)	2171,41	1330,37	2414,74	2357,61	1827,42	2670,83
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1346	0,0985	0,1540	0,1631	0,1315	0,1895
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1924	0,1685	0,2248	0,2220	0,1991	0,2815
Tibialis anterior	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	287,53	245,69	346,84	318,85	257,63	707,66
	Maximális erő (N)	2552,10	2322,61	3176,63	3063,90	2603,71	3416,14
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1476	0,1285	0,1630	0,1482	0,1225	0,1618
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1656	0,1473	0,2021	0,1781	0,1611	0,1922
Peroneus longus	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	290,83	252,43	329,96	256,55	203,47	627,46
	Maximális erő (N)	2398,30	2166,18	3092,63	2339,75	2111,68	2773,67
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1489	0,1269	0,1690	0,1420	0,1108	0,1675
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1827	0,1487	0,2186	0,1660	0,1417	0,1930

1. táblázat. Medián, 25 és 75% percentilis eredmények dinamikus vizsgálat esetében

csökkent, míg a húzó rugalmassági modulus 342,23 MPa-ról 410,08 MPa-ra emelkedett. Mindkét dózisz sugárzás hatására maximális erő értéke csökkent, míg a húzó rugalmassági modulus értéke nőtt.¹⁰

- A TA esetében 18,3-21,8 kGy gamma-sugárzás hatására a maximális erő 3230 N-ről 2890 N-ra, a húzó rugalmassági modulus 292,62 MPa-ról 328,47 MPa-ra változott, 24-28,5 kGy gamma-sugárzás hatására a szakító-erő 2860 N-ről 2420 N-ra, a húzó rugalmassági modulus 269,58 MPa-ról 309,66 MPa-ra változott.^{10,11} A változás tendenciája és mértéke a STG ín változásával megegyező.

Az irodalomban található kutatások¹⁻¹¹ eredményeinek elemzése alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a gamma-sugárzás hatása a hosszú dinamikus vizsgálatok helyett a gyorsabban és egyszerűbben elvégezhető statikus vizsgálatokkal is elemezhető.

Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy a különböző sterilizációs módszerek 5 különböző fajta ín (Achilles, quadriceps, STG, PL, TA) statikus mechanikus vizsgálat mérhető jellemzőit (húzó rugalmassági modulus, maximális erő, nyúlás a maximális erőnél és a szakadási nyúlás) hogyan változtatják meg. A kapott eredményeket a korábbi dinamikus méréseink^{4,5} eredményeivel is összehasonlítjuk. A vizsgálat során a natív ínak mellett, fagyasztott, fagyasztott és alacsony dóziszú, valamint fagyasztott és magas dóziszú gamma sugárzással kezelt ínakat elemeztünk.

Anyag és módszer

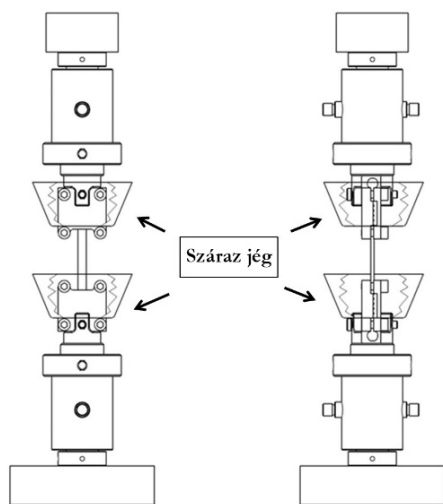
Jelen tanulmányunkban 17 holttestből kivett 152 darab, 5 különböző ín mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk: 31 db Achilles, 31 db quadriceps, 31 db peroneus longus (PL), 31 db semitendinosus + gracilis (STG) és 28

db tibialis anterior (TA). Az ínakat a halál beálltát követően 24 órán belül a korábbi tanulmányokhoz hasonlóan kivették.⁴⁻⁵ Minden kivett szövetet, mechanikai és egyéb elváltozások kiszűrésére a patológusok megvizsgálták. A halottak kórtörténete, illetve vírusos fertőzés miatt további inak kerültek kizárásra a vizsgálatból.

A tárolásra használt sugárvédő oldat összetétele 16.7% 1,2-propanediol, 24.2% dimethylsulfoxide, 3.8% D-trehalose, 2.7% D-mannitol minden w/w (Sigma-Aldrich, Saint Louis, USA)11. Minden minta, kivételt követően külön mintagyűjtő edénybe került, és a mechanikai tesztelésig nem került kivételre. A mintákat véletlenszerűen négy – A, B, C, D – csoportba soroltuk. Az „A” csoport a 22 db natív ínt tartalmaz. A további három csoportba sorolt ínt első lépésben lassan -80°C-ra mélyfagyasztottuk. A „B” csoport 30 darab mélyfagyasztott ínt, a „C” csoport az 50 darab baktérium ölő, alacsony dóziszú (21 kGy) gamma-sugárral kezelt ínt, míg a „D” csoport 50 darab vírus ölő, magas dóziszú (42 kGy) gamma-sugárzással kezelt ínt tartalmaz. (3. táblázat)

A mechanikai vizsgálat előtt az ínakat lassan felolvasztottuk, és a vizsgálat előtti 20 percben 37°C-on tartottuk. A méréseket Instron 8872 szervo-hidraulikus szakítógéppel (Instron Ltd., High Wycombe, UK) és 25 kN-os erőmérő cellával (Instron Dynacell load cell 8800) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Biomechanikai Kooperációs Kutatóközpont Központi Laboratóriumában végeztük, az adatgyűjtő Instron Fasttrack volt. A befogás speciális kialakítású szorító-csavaros fej, amelyhez a korábbi méréseknél is alkalmazott szárazjeges kiegészítést használtuk. (1. ábra)

A száraz jeget a befogó fej köré épített tároló egységbe helyeztük, és ezután 3 perccel



1. ábra. Sematikus ábra a mérési elrendezésről

kezdtek a mérést. A minta hőmérsékletét Flir A325sc típusú infrakamerával folyamatosan ellenőriztük. A befogó pófákba történő elhelyezés után az ínakat 30 másodpercig 250 N-os terhelésig előnyújtottuk, úgy, hogy a befogófej sebessége 20mm/perc volt, majd a keresztmetszet méreteit és a befogó fejek közti távolságot tolmérővel mértük. (2. táblázat)

A terhelést a minta szakadásáig folytattuk, a befogó fej sebessége szintén 20 mm/perc volt. A terhelés során rögzítettük az erő-befogó fej elmozdulása diagramot, és leolvastuk a maximális erő értékét.

A rugalmassági modulus az erő-elmozdulás görbe első progresszív lineáris szakaszának meredeksége. A lineáris szakaszt manuálisan jelöltük ki, amely általában a maximális erő 25-45% közötti tartománya.

Az ínak kivételét, tárolását, gamma-sugárral történő kezelését, valamint a mechanikai vizsgálatokat az Uzsoki utcai kórház és a Péterffy Sándor kórház Tudomány Etikai Bizottsága engedélyezte (engedély száma: 03/2009).

Statisztikai elemzés

Statisztikai elemzése a Statsoft Statistica 13.3 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA) programot használtuk. A mérési eredményekből mediánt számoltunk 25% és 75% percentilis tartományból. A számított paramétereket csoportonként Kruskal-Wallis teszt segítségével hasonlítottuk össze, míg csoportpáronkénti összehasonlítás post hoc elemzéssel történt. Az eredmények közötti eltérés szignifikáns, ha $p \leq 0,05$.

A dinamikus mérések kiértékelésénél ugyanazt a statisztikai elemzést használtuk.

Eredmények

A minták biomechanikai tulajdonságainak összehasonlításához a következő négy paramétert használtuk: húzó rugalmassági modu-

Ín fajta	Keresztmetszeti terület (mm ²)			
	A csoport	B csoport	C csoport	D csoport
Achilles	24,36±3,58	20,65±1,09	28,63±3,66	28,10±4,99
Quadriceps	24,63±8,25	29,73±3,98	24,95±4,89	21,14±6,02
STG	10,02±3,98	13,98±2,22	19,72±4,36	16,36±6,58
TA	18,36±2,67	16,35±1,62	21,99±1,82	17,67±8,04
PL	16,89±1,36	20,38±3,02	16,50±2,31	19,78±8,65

1. táblázat. Átlagos keresztmetszeti területek ín típusonként

lus, maximális erő, nyúlás a maximális erőnél és a szakadási nyúlás. A statikus vizsgálatok eredményeit és a szignifikáns eltéréseit (többszínű háttér), valamint a megbeszélés fejezetben részletezett dinamikus vizsgálatokhoz viszonyított szignifikáns eltéréseket (szürke

háttér) a 3. táblázat foglalja össze.

Az „A” csoportban (natív ín) az ín típusa a maximális erő, nyúlást a maximális erőnél és a szakadási nyúlást szignifikánsan nem befolyásolta.

		A csoport			B csoport		
		Medián	25%	75%	Medián	25%	75%
Achilles	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	85,65	66,25	153,53	103,70	103,25	166,81
	Maximális erő (N)	1628,00	1482,00	2168,05	2085,00	1707,00	3121,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0980	0,0720	0,1540	0,0735	0,0590	0,0850
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,3050	0,2700	0,4380	0,9950	0,0920	0,1140
Quadriceps	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	645,59	409,38	653,13	1309,38	896,88	1737,50
	Maximális erő (N)	1770,00	756,00	1804,00	2817,00	1878,00	3461,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0750	0,0650	0,1070	0,0955	0,0820	0,1040
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1490	0,1480	0,2753	0,1970	0,1710	0,2060
Semitendinosus + gracilis	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	1138,89	983,33	1403,27	2211,11	905,56	2655,56
	Maximális erő (N)	1061,00	730,00	1506,97	2254,00	940,00	2739,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0750	0,0730	0,0826	0,1265	0,1040	0,1490
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1910	0,1870	0,3859	0,1615	0,1510	0,2210
Tibialis anterior	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	1591,67	22,22	3161,11	1908,33	1427,78	2677,78
	Maximális erő (N)	2225,00	442,00	4008,00	2613,50	1487,00	2808,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1490	0,1140	0,1840	0,1125	0,0940	0,1190
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1825	0,1790	0,1860	0,1520	0,1340	0,1810
Peroneus longus	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	1383,33	938,89	1411,11	1788,89	1633,33	1966,67
	Maximális erő (N)	1438,00	1089,00	1633,00	1948,50	1737,00	2065,00
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0990	0,0790	0,1680	0,1265	0,1090	0,1580
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,2850	0,2402	0,2960	0,1780	0,1350	0,2020

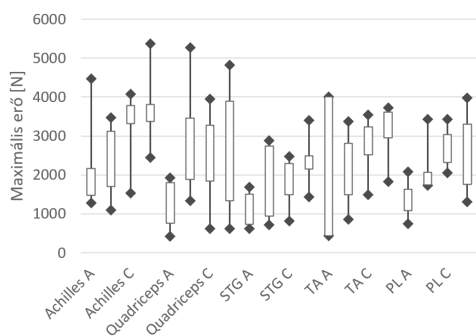
		C csoport			D csoport		
		Medián	25%	75%	Medián	25%	75%
Achilles	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	146,82	126,23	180,24	67,39	21,18	121,34
	Maximális erő (N)	3613,50	3311,00	3779,00	3665,03	3379,09	3814,91
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0890	0,0720	0,1060	0,0696	0,0606	0,0816
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1180	0,1090	0,1630	0,1096	0,1014	0,1520
Quadriceps	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	395,40	239,7300	479,45	73,36	24,04	231,63
	Maximális erő (N)	2789,00	1846,00	3282,00	2684,09	1333,36	3892,05
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0845	0,0740	0,0960	0,0994	0,0686	0,1546
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1475	0,1270	0,1830	0,1377	0,1137	0,2227
Semitendinosus + gracilis	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	588,87	438,56	682,60	637,00	431,41	703,02
	Maximális erő (N)	1813,00	1493,00	2295,00	2456,60	2151,15	2481,31
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0775	0,0600	0,0910	0,0819	0,0670	0,1082
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1185	0,0910	0,1430	0,1232	0,0886	0,1360
Tibialis anterior	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	791,35	693,21	1029,20	899,37	771,54	1122,24
	Maximális erő (N)	2723,50	2514,00	3229,00	3385,63	2954,04	3610,55
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,0890	0,0750	0,1240	0,0920	0,0775	0,1023
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1140	0,0950	0,1310	0,1081	0,0947	0,1329
Peroneus longus	Húzó rugalmassági modulusz (MPa)	725,92	634,85	802,85	515,22	451,74	794,19
	Maximális erő (N)	2764,00	2318,00	3043,00	2706,36	1758,64	3297,57
	Nyúlás a maximális erőnél (mm/mm)	0,1035	0,0910	0,1100	0,1134	0,0966	0,1242
	Szakadási nyúlás (mm/mm)	0,1215	0,1120	0,1360	0,1245	0,1158	0,1330

3. táblázat. Medián, 25 és 75% percentilis eredmények statikus vizsgálat esetében

Az Achilles ín húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan kisebb, mint PL húzó rugalmassági modulusa ($p=0,034789$, piros háttér). (3. táblázat, 2-5. ábra)

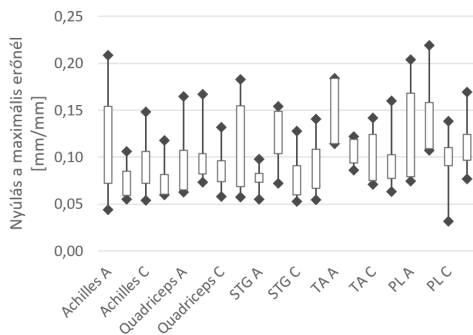
A „B” csoportban (csak fagyasztott ín) az ín típusa szignifikánsan nem befolyásolta maximális erő értékét. A maximális erőnél mérhető nyúlás az Achilles esetén szignifikánsan

kisebb, mint a PL esetében. ($p=0,006891$, kék háttér). Achilles ín húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan kisebb, mint az STG ($p=0,010413$, zöld háttér), a TA ($p=0,011690$, zöld háttér) és a PL ($p=0,014689$, zöld háttér) húzó rugalmassági modulusa. Az Achilles ín szakadási nyúlása szignifikánsan nagyobb, mint a quadriceps ($p=0,033374$, piros háttér), STG ($p=0,030456$, piros háttér), TA ($p=0,028475$, piros háttér), PL ($p=0,031358$, piros háttér) szakadási nyúlása. (3. táblázat, 2-5. ábra)



2. ábra. Maximális erő értékei. Medián, 25% és 75% percentilis, minimum és maximum értékek. Az A-B-C-D betűk az X tengelyen jelölik a 4 csoportot

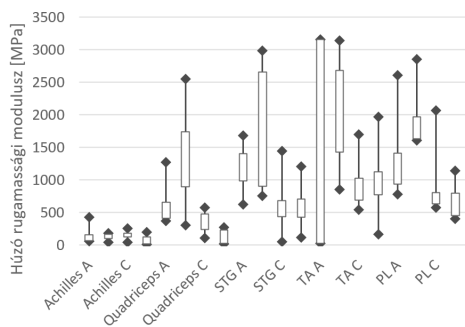
A „C” csoportban (21 kGy gamma-sugárzással kezelt és mélyfagyasztott ín) esetében az STG ín esetén a maximális erő szignifikánsan kisebb, mint az Achilles ín értéke ($p=0,000181$, piros háttér). A maximális erőnél mérhető nyúlás esetén nem találtunk szignifikáns különbséget. Az Achilles húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan kisebb, mint az STG ($p=0,027102$, zöld háttér), TA ($p=0,000014$, zöld háttér) és PL ($p=0,000078$, zöld háttér) húzó rugalmassági modulusa. Hasonlóan a quadriceps húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan kisebb, mint a TA ($p=0,008727$, kék háttér) és PL ($p=0,029959$, kék háttér) ín húzó rugalmassági modulusa. A szakadási nyúlást az ín típusa szignifikánsan nem befolyásolta. (3. táblázat, 2-5. ábra)



3. ábra. Nyúlás értékei a maximális terhelésnél. Medián, 25% és 75% percentilis, minimum és maximum értékek. Az A-B-C-D betűk az X tengelyen jelölik a 4 csoportot

A „D” csoportban (42 kGy gamma-sugárzással kezelt és mélyfagyasztott) az Achilles ín esetén a maximális erő értéke szignifikánsan nagyobb, mint a quadriceps mért értéke ($p=0,017527$, zöld háttér). A maximális erőnél mért nyúlás értéke az Achilles ín esetén szignifikánsan kisebb, mint a PL ($p=0,039292$, kék háttér) esetében mért érték. Az Achilles húzó rugalmasság modulusa szignifikánsan kisebb, mint az STG ($p=0,006609$, piros háttér), TA ($p=0,000029$, piros háttér) és PL ($p=0,003125$, piros háttér) húzó rugalmassági modulusa. A quadriceps húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan kisebb, mint az STG ($p=0,037420$, sárga háttér), TA ($p=0,000302$, sárga háttér) és PL ($p=0,019448$, sárga háttér) ín húzó rugalmassági modulusa. A szakadási nyúlást az ín típusa szignifikánsan nem befolyásolta. (3. táblázat, 2-5. ábra)

A magasabb gamma-dózis hatására az STG maximális erő értéke szignifikánsan kisebb a natív csoporthoz képest ($p=0,011132$, kék háttér) (A vs. D csoport). Míg a kisebb dózissal kezelt PL maximális erő értéke szignifikánsan kisebb, mint a natív ín maximális erő értéke ($p=0,026584$, sárga háttér) (A vs. C csoport). A maximális erőnél mért nyúlást a fagyasztás és a gamma-sugárzás nem befolyásolta. Az STG



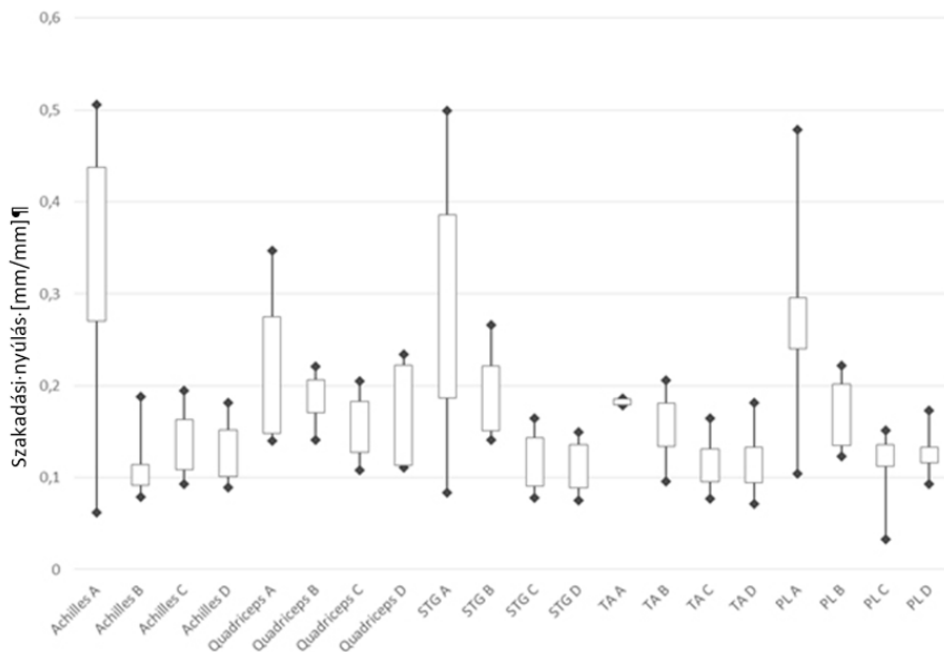
4. ábra. Húzó rugalmassági modulus értékei. Medián, 25% és 75% percentilis, minimum és maximum értékek. Az A-B-C-D betűk az X tengelyen jelölik a 4 csoportot

húzó rugalmassági modulus értékeit szignifikánsan csökkentette mind az alacsony (A vs. C csoport) ($p=0,011241$, sárga háttér) mind a magas dózisu gamma-sugárzás (A vs. D csoport) ($p=0,016035$, sárga háttér). PL ín húzó rugalmassági modulus értékeinél szignifikáns kü-

lönbséget találtunk az alacsony ($p=0,035257$, lila háttér) és magas ($p=0,000736$, lila háttér) dózisu gamma-sugárzással (C és D csoport) kezelt és a fagyasztott ínak (B csoport) között. A magas gamma-sugárzással kezelt STG ín húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan kisebb, mint a fagyasztott STG ín húzó rugalmassági modulusa (B vs. D csoport) ($p=0,041877$, sárga háttér). (3. táblázat, 2-5. ábra)

Megbeszélés

Jelen kutatás célja annak elemzése, hogy 5 különböző fajta ín (Achilles, quadriceps, STG, PL, TA) esetében a különböző sterilizációs módszerek (fagyasztás, fagyasztás+ alacsony dózisu gamma sugárzás, fagyasztás + magas dózisu gamma sugárzás) hogyan változtatják meg a statikus mechanikai vizsgálatból kapott húzó rugalmassági modulus, maximális erő, nyúlás a maximális erőnél és a szakadási nyúl-



5. ábra. Szakadási nyúlás értékei. Medián, 25% és 75% percentilis, minimum és maximum értékek. Az A-B-C-D betűk az X tengelyen jelölik a 4 csoportot

lás értékeit. A kapott eredményeket a korábbi dinamikus méréseink^{4,5} eredményeivel is összehasonlítottuk.

Elemezzük először az Achilles ín vizsgált biomechanikai jellemzőit. A kezelés hatására a statikus vizsgálatnál bekövetkezett változás tendenciája hasonló a dinamikus vizsgálatunknál^{4,5} megfigyelt tendenciához. A 21 kGy dóziszú gamma-sugárzás hatására a húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan nőtt, míg 42 kGy nagyságú dózis kezelt ín húzó rugalmassági modulusa szignifikánsan nem tért el a natív (kezeletlen ín) értékétől, mind a statikus (A: 85,65 MPa, C: 46,82 MPa, D: 67,39 MPa), mind dinamikus vizsgálat esetén (A: 128,18 MPa, B: 157,62 MPa, C: 79,53 MPa). A korábbi kutatás eredménye azt mutatja, hogy a 15-25 kGy dóziszú gamma-sugárzást hatására a húzó rugalmassági modulusa (95,01 MPa) a natív értékhez képest (292,04 MPa) csökkent.¹⁻³

A dinamikus vizsgálatnál meghatározott szakadási nyúlások a gamma-sugárzás hatására nem szignifikánsan, de csökkentek (A: 58,94 % C:44,16 % , D:46,40 %), az irodalomban talált értékekhez hasonlóan.^{1-3,6,10,11}

A statikus vizsgálatnál meghatározott szakadó nyúlás értékei szignifikánsan csökkentek a gamma-sugárzás hatására (A: 30,5 %, C: 11,8 %, D: 10,96 %).⁶ Az irodalomban található eredmények tendenciái⁷⁻¹¹ a jelen kutatás eredményeinek tendenciáihoz hasonló.

Következőben a PL ín változásait elemezzük: A maximális erő értékei a statikus vizsgálat esetén szignifikánsan nőttek (A: 1438 N, C: 2764 N, D: 2706,36 N) míg dinamikus vizsgálat esetén a változás nem szignifikáns (A: 2490,82 N, C: 2398,30 N, D: 2339,75 N). A 15-25 kGy nagyságú dóziszú gamma-sugárzást követően a maximális erő kis mértékben növekedett (2122,8 N). Dinamikus vizsgálat ese-

tén a szakadási nyúlás értékek szignifikánsan nem változtak (A:19,47 %, C: 8,27 %, D:16,60 %), melyeknek tendenciái megegyeznek az irodalomban⁹ talált értékekkel (natív: 43,6 %, gamma-sugárzással kezelt: 40,8%). Ezzel ellentétben a statikus vizsgálatnál meghatározott szakadó nyúlások a gamma-sugárzás hatására (A:28,5%,C:12,15%,D:12,45%) szignifikánsan csökkentek.

Az STG ín esetén a maximális erő értékei a statikus (A:1061 N, C:1813 N, D:2456,6 N) és a dinamikus vizsgálat esetén (A:1922,96 N, C:2171,41 N, D:2357,61 N) egyaránt szignifikánsan változtak, amely az irodalomban található értékek tendenciáival azonos.^{10,11} A húzó rugalmassági modulus értékei a dinamikus vizsgálatnál (A: 186,46 MPa, C: 240,28 MPa, D: 222,66 MPa), míg a statikus vizsgálatnál szignifikánsan nagyobbak voltak (A: 1138,89 MPa, C: 588,87 MPa, D: 637,00 MPa), az irodalomban (A: 322,38 MPa, C: 369,08 MPa, D: 410,08 MPa) talált értékekhez képest is.¹⁰

A TA ín vizsgálatokor a maximális erő értékei a dinamikus vizsgálatnál (A: 2582,22 N, C: 2552,10 N, D: 3063,90 N) és statikus vizsgálatnál (A: 2225 N, C: 2723,5 N, D: 3385,63 N) egyaránt növekedtek, de a változás nem szignifikáns, míg irodalomban a maximális erő értékei (A: 3230 N, C: 2890 N, D: 2420 N) a sterilizálás hatására szignifikánsan csökkentek. A húzó rugalmassági modulus értékei a dinamikus vizsgálatnál (A: 343,24 MPa, C: 287,53 MPa, D: 318,85 MPa), statikus vizsgálatnál (A: 1591,67 MPa, C: 791,35 MPa, D: 899,37 MPa), irodalomban található eredmények^{10,11} (A:292,62 MPa, C: 328,47 MPa, D: 309,66 MPa) egyaránt a parabolikus viselkedést mutatnak.

Végül a quadriceps ín változására irodalmi adat nincs. A statikus vizsgálatnál mért húzó rugalmassági modulus értékek (A: 645,59 MPa, C: 395,40 MPa, D: 73,36 MPa) a sterilizálás hatá-

sára szignifikánsan csökkentek, mint a dinamikus vizsgálat (A: 191,31 MPa, C: 120,24 MPa, D: 83,20 MPa) esetén. Érdekes megfigyelni, hogy a statikus vizsgálatnál meghatározott húzó rugalmassági modulusok szignifikánsan nagyobbak, mint a dinamikus vizsgálatnál meghatározott értékek. A szakadási nyúlás értékei a statikus vizsgálat esetében fele akkorák (A: 14,9 %, C: 14,75 %, D: 13,77 %) voltak, mint a dinamikus vizsgálatnál megfigyelték (A: 33,7 %, C: 32,31 %, D: 43,92 %). A dinamikus vizsgálatkor a nagyobb sugár dózis hatására a szakadási nyúlás értékei szignifikánsan nőnek.

Az eredmények jól mutatják, hogy a magas dózisú gamma-sugárzás roncsolja a szövetet, a mechanikai tulajdonságok romlanak. Ez alapján donorválasztáskor vírusfertőzést

különböző módszerekkel célszerű szűrni. Ekkor lehetőség van arra, hogy sterilizálásra csak az alacsonyabb dózisú gamma-sugárzást használjunk, amely a baktériumokat megöli, de a szöveteket csak kismértékben károsítja. Az eredmények azt is mutatják, hogy a változások tendenciája a vizsgált paraméterek esetén (húzó rugalmassági modulus, maximális erő, nyúlás a maximális erőnél, szakadási nyúlás) a dinamikus és statikus vizsgálatok esetén hasonló, így a változások követésére a statikus vizsgálatok is alkalmasak.

A tárolás és sterilizálás a PL és TA ínak a maximális erő és a rugalmassági modulus paramétereit változtatják meg a legkisebb mértékben. A következő kutatásokban ezt a két ínat célszerű vizsgálni elektron besugárzással és különböző tárolási időekkel.

IRODALOMJEGYZÉK

1. *L. L. Greaves, A. T. Heckler, and C. H. Brown*, "The effect of donor age and low-dose gamma irradiation on the initial biomechanical properties of human tibialis tendon allografts," *Am. J. Sports Med.*, vol. 36, no. 7, pp. 1358–1366, 2008.
2. *K. W. Ng et al.*, "Differential cross-linking and radio-protective effects of genipin on mature bovine and human patella tendons," *Cell Tissue Bank*, vol. 14, no. p61, pp. 21–32, 2013.
3. *I. Mabe and S. Hunter*, "Quadriceps tendon allografts as an alternative to Achilles tendon allografts: a biomechanical comparison," *Cell Tissue Bank*, vol. 15, no. 4, pp. 523–529, 2014.
4. *G. Hangody, G. Szebényi, B. Abonyi, R. Kiss, and L. Hangody*, "Does a different dose of gamma irradiation have the same effect on five different types of tendon allografts? — a biomechanical study," pp. 357–365, 2017.
5. *G. Hangody, G. Pánics, G. Szebényi, R. Kiss, L. Hangody, and K. Pap*, "Pitfalls during biomechanical testing - Evaluation of different fixation methods for measuring tendons endurance properties," *Acta Physiol. Hung.*, vol. 103, no. 1, pp. 86–93, 2016.
6. *B. P. Conrad, M. Rappé, M. Horodyski, K. W. Farmer, and P. A. Indelicato*, "The effect of sterilization on mechanical properties of soft tissue allografts," *Cell Tissue Bank*, vol. 14, no. 3, pp. 359–366, Sep. 2013.
7. *T. Nagura, H. Matsumoto, Y. Kiriya, A. Chaudhari, and T. P. Andriacchi*, "Tibiofemoral joint contact force in deep knee flexion and its consideration in knee osteoarthritis and joint replacement," *J. Appl. Biomech.*, vol. 22, no. 4, pp. 305–313, 2006.
8. *P. A. Banaszkiwicz and D. F. Kader*, "Classic papers in orthopaedics," *Class. Pap. Orthop.*, pp. 1–624, 2014.
9. *C. M. Aguila, G. J.-R. Delcroix, D. N. Kaimrajh, E. L. Milne, H. T. Temple, and L. L. Latta*, "Effects of gamma irradiation on the biomechanical

- properties of peroneus tendons,” Open Access J. Sport. Med., vol. 7, pp. 123–127, 2016.
10. C. R. Balsly, A. T. Cotter, L. A. Williams, B. D. Gaskins, M. A. Moore, and L. Wolfmberger, “Effect of low dose and moderate dose gamma irradiation on the mechanical properties of bone and soft tissue allografts,” Cell Tissue Bank., vol. 9, no. 4, pp. 289–298, 2008.
11. R. J. Butler, S. Marchesi, T. Royer, and I. S. Davis, “The Effect of a Subject-Specific Amount of Lateral Wedge on Knee,” J. Orthop. Res. Sept., vol. 25, no. June, pp. 1121–1127, 2007.
-

Köszönetnyilvánítás

Ezt a kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta (OTKA K 116189).

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Dr. Kiss Rita Mária

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék,

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

06-1/463-1738