



SZENT ISTVÁN EGYETEM

**BIOLÓGIAI ANYAGOK VÍZLEADÁSI TULAJDONSÁGAI
MIKROHULLÁMÚ TÉRBEN**

Doktori (PhD) értekezés

Kurják Zoltán

Gödöllő

2016

**A doktori iskola
megnevezése:** Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudományok

vezetője: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető: Prof. Dr. Beke János
egyetemi tanár,
SZIE, Gépészmérnöki Kar
Folyamatmérnöki Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	7
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége	7
1.2. Célkitűzések	7
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	9
2.1. Az egyensúlyi nedvességtartalom, a szorpciós és deszorpciós izotermák	9
2.2. A víztárolás fizikai háttere	10
2.3. Egyensúlyi nedvességtartalom modellek	11
2.4. A mikrohullámú szárítási kutatások áttekintése	15
2.4.1. <i>A vízfelvonás alapvető összefüggései nagyfrekvenciás térben</i>	15
2.4.2. <i>A mikrohullámú kísérletekben alkalmazott berendezések</i>	20
2.4.3. <i>Az egyenletes mikrohullámú tér biztosítása</i>	21
2.4.4. <i>A száradó anyag viselkedése mikrohullámú térben</i>	21
2.4.5. <i>A szárított anyag minőségének kérdései</i>	23
2.4.6. <i>A szárítási kísérletekben vizsgált növények</i>	23
2.4.7. <i>A mikrohullámú tér egyéb hatásai</i>	23
2.4.8. <i>A mikrohullámú szárítás modellezése</i>	24
2.5. A szakirodalomi áttekintés összefoglaló értékelése	25
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	27
3.1. A vizsgált növényfajták	27
3.1.1. <i>Burgonyafélék (Solenaceae)</i>	27
3.1.2. <i>Ernyősök (Umbelliferae)</i>	27
3.2. Az alkalmazott mérőberendezés	28
3.3. A szárítási kísérletek során használt műszerek	30
3.4. A vizsgálati minták előkészítése	32
3.4.1. <i>A burgonyafélék előkészítése</i>	32
3.4.2. <i>Az ernyős gyökérzöldségek előkészítése</i>	33
3.4.3. <i>Az ernyős növények levélzetének előkészítése</i>	34
3.5. A szárítási kísérletek	35
3.5.1. <i>Az optimális szárítási pozíció meghatározása</i>	35
3.5.2. <i>A mérési folyamat</i>	35
3.6. A kiértékelés módszere	37
4. EREDMÉNYEK.....	43
4.1. A mikrohullámú szárítási kísérletek eredményei	43
4.1.1. <i>A paszternák mérések eredményei</i>	43
4.2. Az ernyősvirágú gyökérzöldségek vizsgálata	46
4.3. A burgonyafélék vizsgálata	57
4.4. Az ernyősvirágú levélzöldségek vizsgálata	68
4.5. Új tudományos eredmények	71
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	73
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	75
7. SUMMARY.....	77
8. MELLÉKLETEK.....	79
M1: Irodalomjegyzék	79
M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	84
M3: Mérési adatok	88
M3.1. <i>A paszternák mérés részletes eredményei</i>	88
M3.2. <i>A petrezselyem gyökér mérések eredményei</i>	98
M3.3. <i>A sárgarépa mérések eredményei</i>	99

<i>M3.4. A zeller gumó mérések eredményei</i>	100
<i>M3.5. A burgonya mérések eredményei</i>	101
<i>M3.6. A padlizsán mérések eredményei</i>	102
<i>M3.7. A paprika mérések eredményei</i>	103
<i>M3.8. A paradicsom mérések eredményei</i>	104
<i>M3.9. A kapor mérések eredményei</i>	105
<i>M3.10. A petrezselyem levél mérések eredményei</i>	106
<i>M3.11. A zeller levél mérések eredményei</i>	107
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	109

JELÖLÉSJEGYZÉK

α_X	csillapítási tényező	[-]
δ	veszteségszög	[°]
ε_0	a vákuum permittivitása	[As/Vm]
Φ	a nedves gőz egyensúlyi relatív páratartalma	[-]
φ	relatív páratartalom	[-]
κ	az anyag elektromos szuszceptibilitása	[-]
Θ	illeszkedési szög	[°]
ρ	halmazsűrűség	[kg/m ³]
ρ_ε	egységnyi térfogatra vetített energiasűrűség értékét	[J/m ³]
σ	az adszorbeált folyadék felületi feszültsége	[N/m ²]
$\sigma_{\Lambda\zeta}$	a folyadék-gőz film felületi nyomása	[Pa]
τ	idő	[s]
λ_T	hővezetési tényező	[W/mK]
a	kísérletekből származó anyagállandó	[-]
b	kísérletekből származó anyagállandó	[-]
C	az adszorbeált nedvesség koncentrációja	[%]
C_{dB}	az iránycsatoló csatolási tényezője	[-]
D	az indukciós vektor	[-]
D_{dB}	az iránycsatoló irányhatása	[-]
D_g	a gőz diffúziós tényezője	[m ² /s]
D_w	folyadék diffúziós tényezője	[m ² /s]
E	Az elektromos térerősség vektor	[V/m]
E_d	a szárítmányban disszipált energia	[J]
E_r	a haladó irányú (belépő) energia	[J]
E_v	a szárítmányról visszaverődő energia	[J]
f	frekvencia	[Hz]
K	permeabilitás	[H/m]
k	veszteségtényező	[-]
L_{dB}	az iránycsatoló csillapítása	[-]
M_b	maximálisan leköthető nedvesség	[%]
M_e	egyensúlyi nedvességtartalom	[%]
m_e	a szárítószekrényből kivett anyag tömege	[g]
m_{mikro}	mikrohullámú szárítás után megmaradt mintatömeg	[g]
m_{minta}	kiinduló minta tömege	[g]
m_v	tömegvesztés mértéke a mikrohullámú szárítás alatt	[g]
$m_{víz}$	a minta víztartalma	[g]
m_{sz}	a minta szárazanyag tartalma	[g]

n	a kísérletek ismétléseinek száma	[-]
p	nyomás	[Pa]
P _d	a szárítmányban disszipált teljesítmény	[W]
P _f	fajlagos teljesítmény	$\left[\frac{W}{g \text{ elvont víz}} \right]$
P _h	a haladó irányú (belépő) teljesítmény	[W]
P _i	anyagállandó	[-]
P _M	a magnetron maximális teljesítménye	[W]
P _r	a szárítmányról visszaverődő teljesítmény	[W]
p _s	telített vízgőznyomás	[Pa]
Q	hőmennyiség	[J]
q _d	disszipált energia	[J]
q _f	fajlagos energiaszükséglet	$\left[\frac{J}{g \text{ elvont víz}} \right]$
q _r	relatív energiaigény	[-]
R	egyetemes gázállandó	[J/kgK]
r	pórusméret	[m]
S	száradási sebesség	[kg/(kg·min)]
s	szórás	[-]
S _f	fajlagos száradási sebesség	$\left[\frac{\frac{kg}{kg \cdot min}}{\frac{W}{g}} \right]$
T	hőmérséklet	[K]
T _{abs}	abszolút hőmérséklet	[K]
U	feszültség	[V]
V	a nedves folyadék moláris fajtérfogata	[m ³ /mol]
w	a termék nedves bázisú víztartalma	[%]
w _{mikro}	nedves bázison mért nedvességtartalom a mikrohullámú szárítás után	[%]
X ₁	minták kiindulási száraz bázison mért nedvességtartalma	[kg/kg]
X _e	száraz bázison mért nedvességtartalom a szárítószekrény után	[kg/kg]
X _{kr}	a relatív energiaszükséglet kezdőpontjához tartozó száraz bázison mért nedvességtartalom	[kg/kg]
X _{mikro}	száraz bázison mért nedvességtartalom a mikrohullámú szárítás után	[kg/kg]
X _r	relatív száraz bázison mért nedvességtartalom	[-]
Y _{mikro}	nedvességviszony a mikrohullámú szárítás után	[-]
Z	impedancia	[Ω]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

A szárítási művelet a mezőgazdaságon belül az egyik legnagyobb energiaigényű eljárás. A mezőgazdaságban alkalmazott szárítási folyamatok a felhasznált energia 22%-át teszik ki, ami egyben az összköltségek 25-30%-át jelentik. Ráadásul a szárítás a mezőgazdaságban az iparinál lényegesen összetettebb feladat, mivel az eljárás során az élő anyag vízkészletének csökkentésével párhuzamosan morfológiailag meghatározott élettani folyamatok is zajlanak. Indokolt tehát, hogy a szárítás műveleti paramétereit tudományos alapossággal válasszuk meg, hogy a termék károsodását, szöveti szerkezetének torzulását elkerüljük és a műveletet energetikailag optimáljuk.

A mezőgazdaságban jelenleg használatos szárító berendezések több mint 95%-a konvektív elven működik. A konvektív szárítás félempirikus modellek segítségével történő leírása jól ismert kutatási területnek számít, ami megfelelő pontosságú adatokat szolgáltat a gyakorlat számára. A mikrohullámú szárítási folyamat energiafelhasználása elvileg egy nagyságrenddel kisebb, mint a konvekciós eljárások alkalmazása esetében ezért, mint lehetséges nem konvektív elven működő eljárás, különösen a nagy kezdeti nedvesség tartalmú zöldségek, gyümölcsök szárításában alkalmazható előnyösen.

Ugyanakkor a mikrohullámú energiaközlés valódi hatékonyságát számos – részben eddig ismeretlen – tényező befolyásolhatja. Ráadásul a mikrohullámú szárítás olyan egyedi jellemzőkkel rendelkezik, amely gyakran meggátolja a folyamat pontos leírását. A számos probléma közül néhányat kiemelve:

- Nedves anyag a mikrohullámú térbe helyezésével módosul a mikrohullámú erőtér.
- A szárítandó biológiai anyagok eltérő morfológiája inhomogén energia-eloszlást eredményez.
- A mikrohullámú energia hatásmechanizmusa az anyagon belül csak részben ismert.
- A disszipált mikrohullámú energia nagyságát nagyban befolyásolja a szárítandó anyag geometriai kialakítása, a nedvességtartalom fázisállapota és a térkitöltés is.

A felsorolt problémák megoldására szükség van a mikrohullámú szárítási folyamat legfontosabb jellemzőinek pontos meghatározására, illetve e jellemzők és a növény morfológiájának kapcsolatának feltárására.

1.2. Célkitűzések

Céлом egy olyan mérésorozatot megvalósítani, amelynek eredményeként a mikrohullámú szárítás energia- és anyagtranszport folyamatainak jellemző paraméterei meghatározhatóak, különös tekintettel a hőközlés módjának és a száradási jellemzők kapcsolatára.

A szárítási folyamatok során olyan zöldség növényeket kívánok vizsgálni, amelyek magas kezdeti nedvességtartalommal rendelkeznek, de morfológiai felépítésük egymástól eltérő. Így nem csak az egyes növények főbb szárítástechnikai paraméterei lesznek meghatározhatóak, hanem az egyes növénycsoportok száradási tulajdonságai is összevethetővé válnak.

Mivel a szárítási folyamatok egyik legfontosabb paramétere az energiaközlés hatékonysága, ezért a vizsgálatokat többféle szárítási teljesítmény alkalmazásával szeretném megvalósítani, így meghatározva a közölt energia nagyság és a hatékonyság közötti kapcsolatot.

Összefoglalva vizsgálataim célja:

- az egyes növények száradási tulajdonságainak meghatározása az alkalmazott mikrohullámú teljesítményszinteken, amelyekből általános összefüggések vezethetők le a csoport tulajdonságaira vonatkozóan,
- a közölt mikrohullámú energia nagyságának a száradási paraméterekre pl. a száradási sebességre, és az energia felhasználásra gyakorolt hatásának meghatározása,
- a vizsgált növénycsoportok, egymástól eltérő morfológiai felépítésének és a szárítás energetikai mutatóinak kapcsolatának feltárása,
- a mikrohullámú energiaközlési folyamat jellemző szakaszainak meghatározása.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

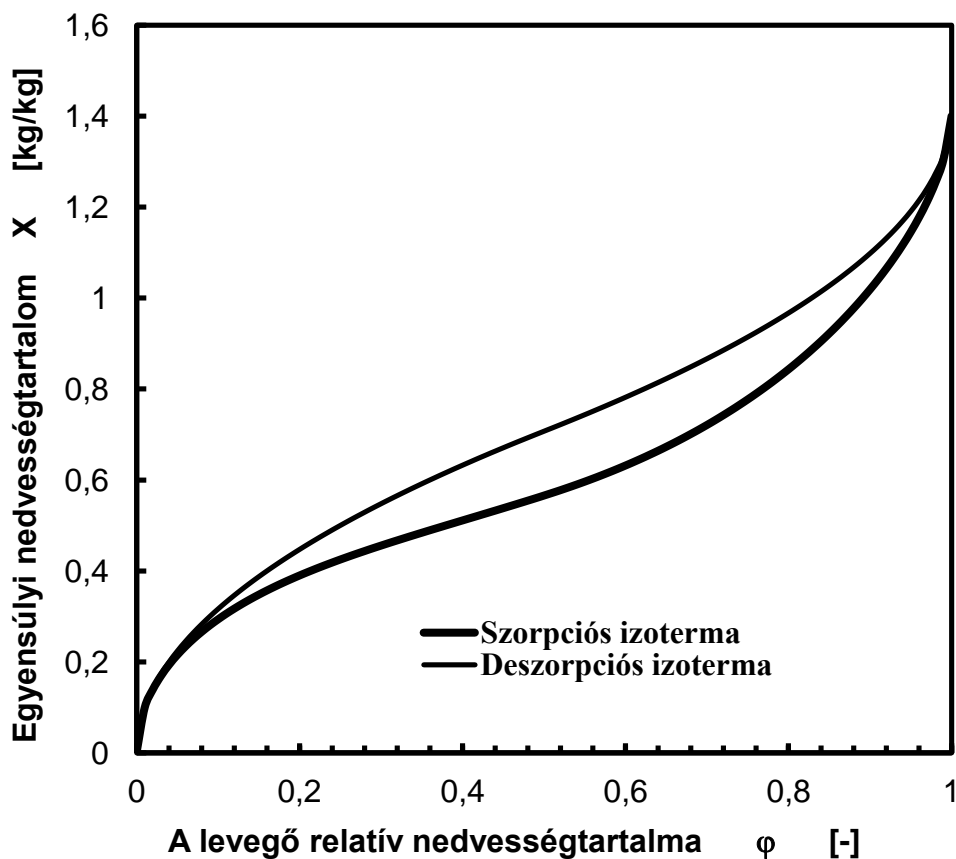
Ebben a fejezetben áttekintem a szakirodalom szárítási folyamatokra vonatkozó kutatásait, különös tekintettel a mikrohullámú szárítási eljárások vizsgálatára és azok eredményeire.

2.1. Az egyensúlyi nedvességtartalom, a szorpciós és deszorpciós izotermák

A biológiai anyagok száradási folyamatában, és így a szárítási technológia kialakításának egyik legfontosabb paramétere az egyensúlyi nedvességtartalom. Ez az a nedvességtartalom, amely adott környezeti paraméterek esetén nem változik. A szárítás során a terményeket ennek a nedvességtartalomnak a közelébe kell szárítanunk a tárolhatóság és minőség megőrzése végett. Az egyensúlyi nedvességtartalom értéke főként a fajtulajdonságoktól, a környezet relatív nedvességtartalmától és a hőmérséklettől függ. Ennek megfelelően az egyensúlyi nedvességtartalom az anyag és a környezete közötti egyensúlyi gőznyomásnak megfelelő nedvességtartalomként is tekinthető, ezért a szárítás matematikai modelljének megalkotásában alapvető szerepet játszik.

Különböző szemesterményekre vonatkoztatva számos - kísérleti úton meghatározott - egyensúlyi nedvességtartalom érték látott napvilágot. Ezen eredmények pontosságát döntően befolyásolták a kiindulási adatok és az alkalmazott mérési módszerek. Több esetben empirikus illetve félempirikus összefüggések segítségével, interpolálva vagy extrapolálva a kapott egyensúlyi nedvességtartalom eredményeket, határozták meg a végső értékeket.

Az anyag és a környezet nedvességtartalma között egy bizonyos idő elteltével egyensúly alakul ki. Ezen a bázison olyan jellemző görbe (*szorpciós izoterma*) szerkeszthető (2.1. ábra), amelynek segítségével az anyag nedvességleadó illetve -felvevő tulajdonságai vizsgálhatók. Adott hőmérséklet és ugyanazon környezeti egyensúlyi relatív páratartalom esetén is különbség van a száradási és a nedvesítéssel kapott egyensúlyi nedvességtartalom értékek között. Ezek az



2.1. ábra A szorpciós és deszorpciós izotermák.

anyagra jellemző adszorpció (nedvesedési) és deszorpció (vízleadási) izoterma csak a két szélső pontban ($\varphi = 0\%$ és $\varphi = 100\%$) találkoznak. Gabonafélék esetén a két izoterma közötti legnagyobb nedvességtartalom különbség – száraz bázison mérve – 1-2%-os értékű. Ez az eltérés nem szignifikáns, ezért felvetődik a mérések hibahatárának kérdése. Ezenfelül egy jóval pontosabb mérési eredmény eléréséhez az egyensúlyi nedvességtartalom értékeinek pontosítása válik szükségessé. (BEKE 1997)

2.2. A víztárolás fizikai háttere

Az adszorpció az anyag és felületén elhelyezkedő gőzmolekulák között jön létre. Ha a kölcsönhatás például erős kémiai kötés hatására jön létre az abszorbens anyag és a abszorbeálódott gőz érintkezési felületén, akkor kémiai adszorpcióról vagy kemisorpcióról beszélünk. Gyenge kölcsönhatás - pl. normál kondenzációs folyamat - esetén fizikai adszorpció jön létre. Azt a kombinált folyamatot, amelyben a adszorpció és abszorpció is lejátszódik – ilyen pl. amikor a gőz anyagcellákon belül kötődik meg – aszorpcióról beszélhetünk.

A biológiai eredetű anyagok – köztük a szemes termények – egyensúlyi nedvességtartalmának meghatározásának modellezéséhez jól használhatók a direkt és az indirekt adszorpciót leíró összefüggések. Ezek közül a modellek közül tekintsünk át néhányat a keletkezésük idejének sorba állításával.

A kapilláris-porózus szilárd anyagok belső kapillárisaiban lejátszódó kondenzációs folyamatát írja le a THOMSON (1871) féle összefüggés:

$$\phi = e^{-\frac{2 \cdot \sigma_{LV} \cdot V \cdot \cos \Theta}{r \cdot R \cdot T_{abs}}}, \quad (2.1)$$

ahol:	ϕ	– a nedves gőz egyensúlyi relatív páratartalma,
	σ_{LV}	– a folyadék-gőz film felületi nyomása,
	Θ	– a kapcsolódási szög,
	V	– a nedves folyadék moláris fajtérfogata,
	R	– az egyetemes gázállandó,
	T_{abs}	– az abszolút hőmérséklet,
	r	– pórusméret.

Az egyenlet érvényességi feltétele, hogy magas legyen a relatív páratartalom ($\Phi > 0,95$), ezen kívül a pórusméretnek a molekulák többségénél a $0,5 \cdot 10^{-9} \text{ m} < r < 10^{-7} \text{ m}$ közötti tartományba kell esnie.

Az eredmények alsó korlátját molekula méret alapján határozták meg. Ez az érték $r \approx 10^{-10} \text{ m}$. A felső korlátot a meniscusnál kialakuló gőznyomás határozza meg, amely közelítőleg megegyezik a felületen mérhető nyomással.

A következő modell megalkotásakor az adszorpció folyamatot az abszorbens felületén létrejövő adszorbeált molekulákból álló vékony film kialakulásához kötötték. Ebben az összefüggésben a gőzfázis és a kialakult réteg közötti dinamikus egyensúlyi állapotot, a rétegből történő kipárolgás és a rétegen kialakuló lecsapódás egyensúlyi helyzetével indokolták.

A LANGMUIR (1918) által megalkotott összefüggés alapján az egyensúlyi nedvességtartalom a következőképpen számítható.

$$\frac{M_e}{M_e^*} = c \cdot \frac{\phi}{1+c\phi}, \quad (2.2)$$

ahol: M_e - az egyensúlyi nedvességtartalom,
 M_e^* - a teljes egyszeres réteg kialakulásához szükséges nedvességtartalom.

Az egyenletben a c értéke az abszolút hőmérséklet, az adszorpciós hő és a cseppfolyósodás hőjének különbségének függvényében adható meg.

Annak ellenére, hogy az egyenlet alapul szolgál a szemesterményekre megalkotott egyensúlyi nedvességtartalom modelleknek, mégsem alkalmazható olyan esetekben, amikor többrétegű vagy kémiai kötésekre alapuló adszorpcióról van szó.

A többrétegű adszorpció esetére jól alkalmazható a BRUNAUER, EMMETT, TELLER (1938) (BET) modell. Ez az összefüggés amellett, hogy többrétegű adszorpciót jellemez, feltételezi, hogy párolgási és lecsapódási sebesség az adszorbeátum n -számú rétegében mind ugyanolyan mértékű. Az elmélet további feltételezése, hogy a felületi réteget követő rétegek normál kondenzációs hővel kondenzálódnak le. Ez a modell a következő alakban írható fel:

$$\frac{M_e}{M_e^*} = c \cdot \frac{\phi \cdot (1-(n+1) \cdot \phi^n)}{(1-\phi) \cdot [1-(1-c) \cdot \phi - c \cdot \phi^{n+1}]}. \quad (2.3)$$

Az egyenlet eredményeként olyan görbét kapunk, amelynek $\phi = 0,5$ feletti szakasza igen meredek, így a legtöbb mérési pontra jól illeszkedik. Az $n = 1$ esetén a BET modell a Langmuir egyenletet (2.2.) adja eredményül, míg ha $n \rightarrow \infty$ akkor az egyenlet a következőképpen alakul:

$$\frac{M_e}{M_e^*} = c \cdot \frac{\phi}{(1-\phi) \cdot (1-\phi+c\phi)}. \quad (2.4)$$

A BET modellnek már számos továbbfejlesztett változata ismert. Ezek közül az egyik legismertebb a BRUNAUER et al. (1940) által megalkotott, amely már figyelembe veszi a kapilláris adszorpció jelenségét is.

2.3. Egyensúlyi nedvességtartalom modellek

Az egyik első, jól használható egyensúlyi nedvességtartalom adatokat a búzára vonatkozóan BABBIT (1949) közölte a szemestermények szorpciós izotermáinál megfigyelhető hiszterézis jelenség leírásával együtt. Az adatok alapján HENDERSON (1952) a következő elméleti összefüggést alkotta meg:

$$1 - \phi = e^{-a \cdot M_e^b}, \quad (2.5)$$

ahol: a ; b - kísérletekből származó anyagállandó.

A kísérletekből származó egyensúlyi nedvességtartalom és az egyenlet megoldásaként kapott eredmények jó közelítésként alkalmazhatók más higroszkópos tulajdonsággal rendelkező anyag esetén is. Az elmélet igazolására termodinamikai viszonyok alapján felírható:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial v} = - \left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)_T. \quad (2.6)$$

A szilárd anyag és az adszorbeált nedvesség között kapcsolat van azon a p gőznyomáson, amelyet a vizsgált felületen mérhetünk. Ennek alapján felírható:

$$1 - \phi = e^{-\frac{C \cdot R \cdot T}{\Delta \sigma}}, \quad (2.7)$$

ahol: σ – a szilárd-folyadék határfelületen lévő adszorbeált folyadék felületi feszültsége,
 $\Delta \sigma$ – az adszorpció során megváltozott felületi feszültség,
 C – a nedves felület felületegységére vonatkozó adszorbeált nedvesség koncentrációja,
 p – az ozmózisnyomás a folyadék-gőz határfelületen létrejövő adszorpció esetén.

Henderson a (2.7) egyenlet illetve a C ; $\Delta \sigma$ és az M_e függvénykapcsolata alapján a következő összefüggést vezette le:

$$1 - \phi = e^{-c \cdot T_{\text{abs}} \cdot M_e^b}. \quad (2.8)$$

Ahol a és b konstansok megegyeznek a (2.5) egyenletben lévő konstansokkal, amelyek a kísérleti izotermák alapján határozhatók meg. Henderson a különböző anyagokra megadott konstansokat táblázatos formában foglalta össze. A táblázatban szerepeltek pl. a búza jellemzői a 21-32 °C-os hőmérséklet tartományban.

A modell teljesíti az egyensúlyi nedvességtartalom görbékre vonatkozó feltételeket, amelyek a következőkben foglalhatók össze:

$$\begin{aligned} - M_e = 0 \text{ esetén} & \quad \Rightarrow \quad \phi = 0; \\ - M_e \rightarrow \infty \text{ esetén} & \quad \Rightarrow \quad \phi = 1. \end{aligned}$$

A Henderson egyenletek felhasználásával PICHLER (1956) végzett kísérletet, amely alapján különbséget tett a porózus anyagokra vonatkozó vízfelvétel két mechanizmusa között:

- adszorpció alacsony relatív páratartalom ($\phi < 0,65$) esetén és
- kapilláris kondenzáció magasabb relatív páratartalom ($\phi > 0,65$) mellett.

Az első vízfelvételi módozatára alkalmazható a termodinamikai határréteg elve és ennek megfelelően a Henderson egyenlet (2.8) is. Azonban Pichler rámutatott az egyenlet hiányosságára, miszerint nem számol a hőmérséklet eltolódással. Ebből arra következtetett, hogy az egyenletben szereplő konstansok hőmérsékletfüggők.

Pichler megfigyeléseitől függetlenül DAY, NELSON (1965) a Henderson egyenlet (2.5) módosított, 4 paraméteres alakját vezették be:

$$1 - \phi = e^{-a \cdot M_e^b}, \quad (2.9)$$

ahol: $a = P_1 \cdot T^{P_2}$
 $b = P_3 \cdot T^{P_4}$
 P_i ($i = 1,2,3,4$) - a mérési adatok alapján meghatározott anyagállandók,
 T - a hőmérséklet F° -ben.

A Henderson egyenlet egy másik négyparaméteres továbbfejlesztését CHEN, CLAYTON (1971) alkotta meg a következő formában:

$$\phi = e^{-a_1 \cdot T_{\text{abs}}^{b_1}} \cdot e^{-a_2 \cdot T_{\text{abs}}^{b_2} \cdot M_e}, \quad (2.10)$$

ahol: a_i és b_i ($i = 1, 2$) - anyagállandók.

Az adszorpciós folyamat leírására született elméletek alapján megállapítható, hogy egy gőzmolekula adszorpciójához szükséges munka megegyezik az ún. térerő leküzdésére szolgáló és a kondenzációs munka összegével. A térerő legyőzéséhez szükséges munka biztosítja a gőzmolekula felszínen maradását.

E megállapítás alapján további egyensúlyi nedvességtartalom megadási módszerek születtek, amelyek közül HARKINS, JURA (1944) a következő egyenletet állította fel:

$$\phi = e^{a - \frac{b}{M_e^2}}, \quad (2.11)$$

ahol: a és b hőmérsékletfüggő anyagállandók

Ez a modell gabonafélék esetében alkalmazható olyan esetekben, amikor $\phi > 0,3$. A fenti egyenlet egy tovább fejlesztett változata alapján CHUNG, PFOST (1967) a szorpciós vagy szabad energia meghatározására a következő javaslatot tette:

$$-\Delta F = a \cdot e^{-b \cdot M_e}. \quad (2.12)$$

A termodinamikai egyenletek segítségével a fenti egyenlet egy másik alakban is felírható:

$$\ln \phi = -a \cdot e^{-\frac{b \cdot M_e}{R \cdot T_{\text{abs}}}}, \quad (2.13)$$

ahol: a és b hőmérsékletfüggő anyagállandók.

Ez az összefüggés – a (2.7) egyenlettől kissé eltérően – a $0,2 < \phi < 0,95$ értékhatárok között alkalmazható.

Az eddig ismertett elméletek összevonásával további következtetéseket lehetett tenni. Ennek egyik eredménye a SMITH-féle (1947) modell, amely a Langmuir egyenletet (2.2) felhasználva modellezte a BET egyenlet természetes kondenzációra felírható megoldását. Ez a modell alkalmas a megkötött nedvesség modellezésére is.

$$M_e = M_b - a \cdot \ln(1 - \phi), \quad (2.14)$$

ahol: M_b - a maximálisan leköthető nedvesség.

A fenti egyenlet alkalmazhatósági korlátait határozta meg BECKER, SALLANS (1956), amikor megadták búza esetén a $25^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ -os, és a $0,5 < \phi < 0,95$ tartományokat. A korlátok meghatározásához szakaszonként más-más elmélet szerint írták fel az egyenleteket. A $0,12 < \phi < 0,65$ tartományban lineáris közelítést használtak. Míg az előző tartomány egy részét lefedő $0,04 < \phi < 0,3$ szakaszon pedig a BET egyenletet.

Az abszorbeálódott réteg kialakulásának kétféle hatásmechanizmusát feltételezve, a szorpciós izotermák között létrejövő hiszterézis jelenségének magyarázatára állított fel összefüggést YOUNG, NELSON (1967). Elméletük szerint a víz abszorpciója csak akkor jön létre, ha már

elegendő nedvesség kondenzálódott természetes úton ahhoz, hogy létrejőjön a megfelelő erősségű diffúziós áram. Ellenkező irányú nedvességmozgás esetén azonban addig nem indul meg a diffúzió a sejtfalakon keresztül, amíg a nedvesség felületi rétegei fel nem bomlanak. Ez a késleltetett hatásmechanizmus a hiszterézis jelenségének okozója. Matematikai alakban megfogalmazott összefüggéseik a adszorpció és a deszorpció folyamatra a következő formában írható fel:

$$M_e = a \cdot (\alpha + \beta) + b \cdot \beta \cdot \phi, \quad (2.15)$$

$$M_e = a \cdot (\alpha + \beta) + b \cdot \beta \cdot \phi_{\max}, \quad (2.16)$$

ahol: α és β a ϕ és T függvényei.

Mivel a (2.15) és (2.16) egyenletek a BET és Smith (2.14) egyenletek átalakított változatai, ezért a relatív nedvességtartalom teljes tartományában alkalmazható.

A szorpció izoterma aszimptotikus alakjának figyelembe vételével és az ismertett függvények megfelelő kombinációjának kiválasztásával STROHMAN, YOERGER (1967) a következő egyenletet hozták létre:

$$\phi = e^{a \cdot e^{-b \cdot M_e \cdot \ln p_s + c \cdot e^{-d \cdot M_e}}}, \quad (2.17)$$

ahol: p_s a telített vízgőznyomás,
a, b, c, d konstansok.

Kelvin egyenletét használva a deszorpció alatti meniscus (félgömb) alakjának meghatározásához NGODDY, BAKKER-ARKEMA (1970) (1972a) (1972b) (1972c) elkészítették az adszorpció kapilláris elméletét, amelyben leírják az ún. duzzadó test kialakulásának feltételeit. Az adszorpció alatti meniscus hengeres alakjának számításához felhasználták COHAN (1938) összefüggéseit is. A pórusos felületek teljes nedvesedésének kialakulását feltételezve az összefüggés a következő alakban írható fel:

$$\phi_{\text{ads}}^2 = \phi_{\text{des}}, \quad (2.18)$$

ahol: $\eta \geq 1$ ami azt eredményezi, hogy $\phi_{\text{ads}} \geq \phi_{\text{des}}$, így az adszorpció izotermája a deszorpcióé alatt marad, ami az 2.1.ábrán is megfigyelhető.

Az eddigi ismertett elméleti és félig kísérleti modellek nem minden esetben adnak megfelelő eredményt relatív páratartalom teljes tartományában. További probléma, hogy ezek az összefüggések általában egy típusú gabonaféle tulajdonságainak leírására alkalmasak. Emiatt ésszerűnek tűnik BROOKER, BAKKER-ARKEMA, HALL (1974) által javasolt megoldást alkalmazni, amely szerint, amíg nem ismerjük a szorpció és deszorpció jelenségét leíró fizikai folyamatokat, addig az adatok meghatározására egyszerűbb a tisztán kísérleti megközelítést alkalmazni. Ennek oka, hogy nagyobb pontosság érhető el a kísérleti közelítések alkalmazásával.

A modellek alkalmazási területe a magas hőmérsékletű szárítás, amelynek folyamán a felületi nedvességtartalom néhány százalékkal nagyobb lesz, ha a környezeti páratartalom alacsonyabb értékű. Erre az esetre SIMMONDS, WARD, McEWEN (1953) vezették be a dinamikus nedvességtartalom fogalmát a logaritmikus szárítási törvény igazolásához, amelyet a mérési eredményeik közelítéséhez használtak. A dinamikus egyensúlyi nedvességtartalom fogalmának helyességét a BAKKER-ARKEMA, HALL (1965) azonban egy lucernaszárítási kísérletre hivatkozva cáfolta.

2.4. A mikrohullámú szárítási kutatások áttekintése

A mikrohullámú szárítás technológia kialakítását a szárítandó anyagok kiváló dielektromos tulajdonságai teszik lehetővé. Az anyagok magas nedvességtartalma miatt, a mikrohullámú térben az anyagon belül jelentős hőfejlődés kezdődik, amely alkalmas a főleges nedvességtartalom eltávolítására. Megfelelő kezelési paraméterek alkalmazásával a hőmérséklet gradiens és a nedvesség diffúzió iránya azonos lesz, ami rövidebb száradási időt eredményez. A kéméletes szárítási technológia megvalósítása is egyszerűbb a konvektív eljárásokhoz képest, mivel a mikrohullámú folyamat szabályozása kitűnően automatizálható. A következőkben az ezen a területen folytatott kutatások eredményeit tekintem át.

2.4.1. A vízelvonás alapvető összefüggései nagyfrekvenciás térben

A mikrohullámú kezelés során - az anyagminőség függvényében - az anyag belseje felé haladva a térerősség nagyságának csökkenését tapasztalhatjuk. Ez a folyamat legegyszerűbben azzal magyarázható, hogy az anyag alkotóelemei külön-külön is saját elektromos momentummal rendelkeznek, vagy a kezelés előtti állapotban semleges szerkezetű belső elrendeződés a rá ható elektromágneses tér hatására megváltozik, polarizálódik. Az anyag ϵ tulajdonságát a dipólusmomentum, vagy más néven az elektromos tér polarizációja (\bar{P}) jellemzi, amelyet egységnyi térfogatra számíthatunk:

$$\bar{P} = \epsilon_0 \cdot \kappa \cdot \bar{E}, \quad (2.19)$$

ahol: $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12}$ As/Vm a vákuum permittivitása,
 κ - az anyag elektromos szuszceptibilitása,
 \bar{E} - a elektromos térerősség.

Mivel a dielektrikum a vákuumhoz képest eltérő módon viselkedik, így azt az indukcióvektort is befolyásolja, amely a mágneses mezőt kelti:

$$\bar{D} = \epsilon_0 \cdot \bar{E} + \bar{P}. \quad (2.20)$$

Felhasználva az abszolút dielektromos állandó ($\epsilon = \epsilon_0$) és a relatív permittivitás ($\epsilon = 1 + \kappa$) fogalmát, az indukciós (eltolás) vektor a következő összefüggéssel számítható:

$$\bar{D} = \epsilon \cdot \bar{E}. \quad (2.21)$$

Mivel az elektromos szuszceptibilitás értéke általában komplex szám, ennek megfelelően az abszolút permittivitás is hasonlóformájú, ezért:

$$\bar{D} = (\epsilon' - j\epsilon'') \cdot \bar{E}, \quad (2.22)$$

ahol: ϵ' - a komplex dielektromos állandó reális része,
 $j\epsilon''$ - a komplex dielektromos állandó képzetes része.

Mivel az abszolút permittivitás komplex formában írható fel, így feltételezhető, hogy a molekulák közötti súrlódás csillapítja a külső tér polarizáló hatását. A valós dielektrikumok vezetőképességgel (σ) rendelkeznek, amiből az is következik, hogy saját disszipációjuk is van.

Az ilyen típusú a dielektrikumokban létrejövő áramsűrűség értéke Maxwell kiegészített IV. törvénye értelmében:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} + j \cdot \omega \cdot (\varepsilon' - j \cdot \varepsilon'') \cdot \vec{E}, \quad (2.23)$$

ahol: $\sigma \cdot \vec{E}$ - a vezetési eltolási áramsűrűség,
 $j \cdot \omega \cdot \varepsilon' \cdot \vec{E}$ - a fluxusváltozásból származó eltolási áramsűrűség.

Ha az egyenlet valós és a képzetes részeit egy csoportba rendezzük:

$$\vec{J} = j \cdot \omega \cdot \varepsilon' \cdot \vec{E} + (\omega \cdot \varepsilon'' + \sigma) \cdot \vec{E}, \quad (2.24)$$

ahol: $\omega \cdot \varepsilon'' + \sigma$ - a teljes hatásos vezetőképesség,
 $(\omega \cdot \varepsilon'' + \sigma) \cdot \vec{E}$ - a hatásos teljesítmény.

Az eredő áramsűrűség-vektor a térerősség vektorával ($90^\circ - \delta$) szöget zár be. A δ értéke az ún. veszteségszög, amelynek értékét a következő módon számíthatjuk:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma + \omega \cdot \varepsilon''}{\omega \cdot \varepsilon'}. \quad (2.25)$$

Ha az összefüggést a mikrohullámú térben kialakuló viszonyokra írjuk fel, akkor a körfrekvencia nagy értéke miatt a $\sigma \ll \omega \cdot \varepsilon''$ egyenlőtlenség áll fent, ennek megfelelően

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (2.26)$$

A veszteségszög, pontosabban annak tangense a dielektrikum egyik alapvető fontosságú anyagi jellemzője. Meghatározása azonban bonyolult feladat, hiszen az esetek többségében csak mérési módszerrel lehetséges. Ezek a mérések viszont már tartalmazzák a vezetőképesség hatásait is. (BEKE 1997)

Az anyag relatív dielektromos állandóját is méréssel lehet meghatározni. A szemes termények dielektromos állandójának meghatározására, kísérleteikben NELSON, (1965) és SEMBERY (1979) a következő összefüggést alkalmazták:

$$\varepsilon_r = f(f, w, \Theta, \rho), \quad (2.27)$$

ahol: f - a frekvencia,
 w - a termény nedves bázisú víztartalma,
 Θ - az anyag hőmérséklete,
 ρ - a halmazsűrűsége.

A mikrohullámú hőközlés esetén a végeredmény szempontjából nem szükséges elkülöníteni egymástól a δ és az ε_r értékeit, több forrás pl. GINZBURG (1976), IMRE (1974), SITKEI (1981) szerint a veszteségtényező megadására a két tényező szorzatát alkalmazzák:

$$k = \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.28)$$

A diffúziós és a termodiffúziós gradiens azonos iránya akkor biztosítható, ha az energia behatolási mélysége megegyezik a vizsgált anyag egyenértékű sugarával. Ekkor az anyag belső hőmérséklete magasabb lesz, mint a felületen mérhető. A mikrohullámú szárítás ebben az esetben lesz optimális.

GINZBURG (1976) szerint, ha az alkalmazott hullámhossz az anyag valamely hossz méretével megegyezik, ún. állóhullám alakul ki, amelynek eredményeképpen az amplitúdópontokon túlhevülés, a hullámcsomópontokon pedig hideg pontok kialakulása következhet be.

Ha az alkalmazott frekvencia csökken, ezzel arányosan növekszik a termények dielektromos állandója és veszteségszöge, ami a folyamat hatásfokának javulását eredményezi. Ekkor azonban megnő az elektromos teljesítményvesztés, vagyis a keletkezett hőmennyiség az alkalmazott frekvenciával egyenesen arányos. Ezért a frekvencia túlzott csökkentése nem jelent jó megoldást mivel a szárítás teljesítmény igénye viszonylag magas.

Mivel egyfajta energiatranszportról van szó - a mikrohullámú folyamat elemzése során az egyik legfontosabb szerepe az elektromos mező energiájának van. A hagyományos fizikai összefüggést alapul véve:

$$W = F \cdot s. \quad (2.29)$$

A fenti egyenletet mikrohullámú energiaközlésre alkalmazva, a homogén elektromos mező energiája a következő összefüggéssel számítható:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot V, \quad (2.30)$$

ahol: V - a száradó anyaggal kitöltött térfogat

Szemestermények mikrohullámú szárításakor homogén térről nem beszélhetünk, mivel a szemek nem izotróp anyagok. Ennek megfelelően az inhomogén mező energiájának meghatározásához az egységnyi térfogatra vetített energiasűrűség értékét külön meg kell adni.

$$\rho_e = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot E^2. \quad (2.31)$$

Ez alapján a teljes mező energiája

$$W = \int_V \rho_e dV. \quad (2.32)$$

Ezt az egyenletet a szemes termények mikrohullámú szárításának gyakorlatában nem lehet megoldani.

A mikrohullámú energiaelnyelés hatására keletkező hőmérséklet növekedésének nagysága meghatározható, ha homogén hőmérséklet-eloszlást veszünk alapul.

$$\frac{dt}{d\tau} = 9,3 \cdot 10^{-12} \cdot E^2 \cdot f \cdot \frac{\varepsilon''}{\rho \cdot c}, \quad (2.33)$$

ahol: E - az elektromos térerő,
 c - a fájhő
 f - a frekvencia
 ρ - az abszorbens sűrűsége

Ebből az összefüggésből elméletileg meghatározható a száradó anyag hőmérséklete, de problémát okoz, hogy az ε'' , E , ρ és c értékei maguk is függenek hőmérséklettől. Emellett a fázisváltásból következő idő szlip sem hagyható figyelmen kívül.

Jó közelítést jelenthet, ha a elektromos áramerősség melegítő hatásának komponensét IMRE (1974) szerint az alábbi egyenlet segítségével számítjuk:

$$I_d = I \cdot \operatorname{tg} \delta \approx 5,56 \cdot 10^{-13} \cdot f \cdot k \cdot U \cdot V. \quad (2.34)$$

A fenti egyenletből a dielektrikumban disszipált teljesítményt következő módon adható meg:

$$P_d = U \cdot I_d = 5,56 \cdot 10^{-13} \cdot f \cdot k \cdot U^2 \cdot V, \quad (2.35)$$

ahol: U - az alkalmazott feszültség,
k - a veszteségtényező,
V - a besugárzott térfogat,
f - a frekvencia.

Az összefüggés a következő feltételek mellett szolgáltat pontos eredményt:

- a tér alakja a kockához közelít
- a veszteségtényező állandó
- fennáll a $\operatorname{tg} \delta = \cos(90-\delta)$ egyenlőség
- a szárítás szakaszos

A mezőgazdaságban alkalmazott szárítástechnológiák esetén a feltételek nemhogy együttesen nem teljesülnek, de rendszerint egyenként sem megoldhatók.

A téma alapvető folyamatait megvizsgálva ALMÁSSY (1973) alapján megállapítható, hogy az anyag felületére normális irányból besugárzott elektromágneses energia egy része elnyelődik, míg másik része reflektálódik, ahogyan az a Kirchhoff törvény alapján felírt összefüggésben (2.36) is látható.

$$P_r = |R_f|^2 \cdot P_{in}, \quad (2.36)$$

ahol: R_f - reflexiós tényező

A reflexiós tényező és a permittivitás kapcsolatát kifejezhetjük:

$$R_f = \frac{Z_\epsilon - Z_0}{Z_\epsilon + Z_0} = \frac{\epsilon^{-\frac{1}{2}} - 1}{\epsilon^{-\frac{1}{2}} + 1}, \quad (2.37)$$

ahol: Z_ϵ - az anyag belső impedanciája
 Z_0 - az abszolút vákuum belső impedanciája

Az összes energia azon része, ami nem verődik vissza az anyagban elnyelődik. A hullámterjedési állandó, amely homogén, valós dielektrikumban jellemzően komplex formában írható fel, amelyhez a ϵ és a permittivitás értékét is felhasználjuk.

$$\gamma = \alpha_c + j\beta = \omega \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot (\epsilon' - j\epsilon'')}, \quad (2.38)$$

ahol: α_c - a csillapítási tényező, amelyet a következő módon számíthatunk:

$$\alpha_c = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_o \cdot \mu_o \cdot \left(\frac{\varepsilon'}{2}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} - 1. \quad (2.39)$$

Az elnyelt mikrohullámú teljesítmény – a távolság függvényében – exponenciális függvény szerint változik:

$$P_d = P_{tr} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_c \cdot x}, \quad (2.40)$$

ahol: P_{tr} - az anyag felületén x irányban áthaladó mikrohullámú teljesítmény.

Ha megvizsgáljuk a penetrációs mélység számítási összefüggését, a normál irányban besugárzott energia nagysága a felület távolságától függően változik. Ez azt jelenti, hogy az energia d távolságig 63,2%-ban, $2d$ -ig 86,5%-ban, $4d$ rétegvastagságban pedig 98,2%-ban nyelődik el.

Ez a penetrációs mélység felírható a csillapítási tényező, és ennek értelmében az anyag permittivitása segítségével:

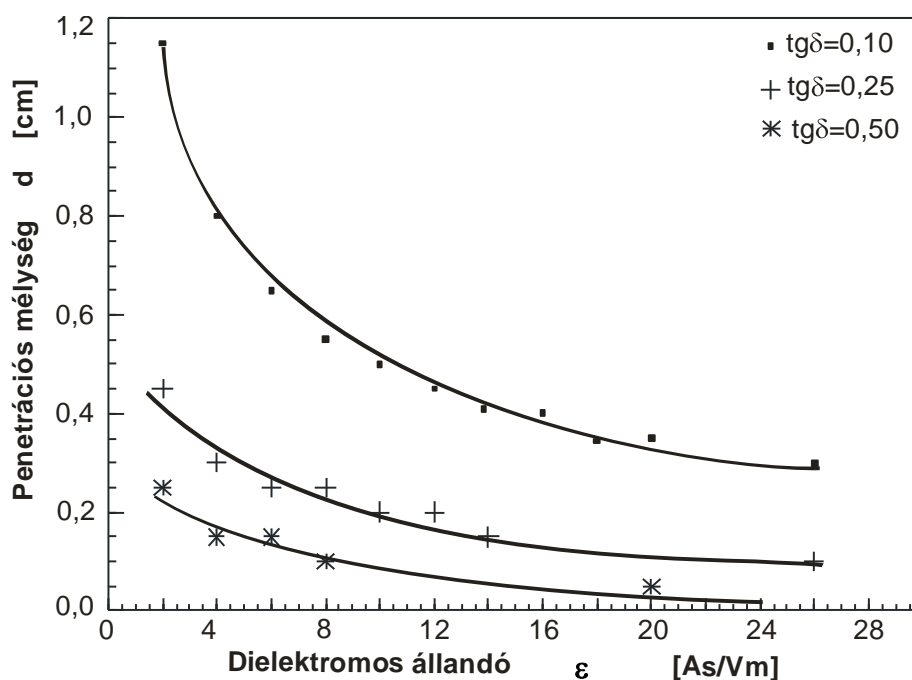
$$d = \frac{1}{2 \cdot \alpha_c} = \left\{ \varepsilon_o \cdot \mu_o \cdot \left(\frac{\varepsilon'}{2}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (2.41)$$

A penetrációs mélység permittivitás függősége veszteséges végtelen feltér dielektrikumra a 2.2. ábrán látható. Ennek nagysága a gyakorlatban λ értékétől függően 0,1-1,0 körüli.

Látható, hogy a penetrációs mélység értéke szorosan kapcsolódik a szárított anyag méreteihez. Ha az anyag mérete többszörösen meghaladja a penetrációs mélység értékét, akkor a hőmérséklet gradiens iránya az anyag közepe felé mutat, ami tulajdonképpen megegyezik a hagyományos, konvektív szárítás viszonyaival. Viszont ha az anyag mérete sokkal kisebb, mint a behatolási mélység, akkor a közölt mikrohullámú energia az anyag középpontjában koncentrálódik, ami így az anyag túlmelegedéséhez, roncsolódásához vezethet. Ennek kiküszöbölésére a gyakorlatban többféle megoldás létezik. Az egyik ilyen megoldását mutatja be MUJUMDAR (2007); és KUDRA, MUJUMDAR (2009), amikor a szemcsés anyagokat szuszpendált állapotban mikrohullámú energiaközléssel szárítják a fluid ágyas illetve vibrációs szárítóban. Szilárd anyagok esetén, mint pl. a fa mikrohullámú szárítása esetén alacsonyabb frekvencia alkalmazásával jobb energiahasznosulás mellett nagyobb mikrohullámú teljesítmény érhető el.

Egységes anyagszerkezetű anyagok esetén a permittivitás értéke nem függvénye a hőmérsékletnek és ilyenkor nincs felületi hőveszteség sem. A gyakorlatban viszont a mikrohullámmal kezelt anyagok éppen ellenkező felépítésűek, ezért az ideális esetre érvényes összefüggések nem alkalmazhatók eredeti formájukban. Ráadásul a mikrohullámú energia eloszlása sem teljesen exponenciális összefüggés alapján írható fel. A száradási folyamatban az alapvető technológiai paraméterek (reflexiós koefficiens, csillapítási tényező, penetrációs mélység, veszteségtényező, stb.) a hőmérséklet, a kezelési idő és az anyagi jellemzők függvényei.

A lehetőségeket és a korlátokat áttekintve a konvekciós terményszárítás kiváltásához elvileg a mikrohullámú szárítás látszik az egyik legperspektivikusabb megoldásnak. Ehhez azonban további széleskörű vizsgálatok szükségesek, mivel az ipari tapasztalatok mechanikus átvétele, illetve alkalmazása hamis következtetések levonásához vezethet. (VOSS 1969)



2.2. ábra A dielektromos állandó hatása a penetrációs mélységre veszteséges végtelen féltér dielektrikumiban

2.4.2. A mikrohullámú kísérletekben alkalmazott berendezések

A mikrohullámú terményszárításhoz alkalmazott kísérleti berendezések kiválasztása, illetve kifejlesztése kulcsfontosságú probléma, mivel ezekben a multimódusú készülékekben a kísérlet jellegétől, valamint a töltet extenzív és intenzív tulajdonságaitól függően módosulhatnak a kezelőtér alapvető paraméterei. Legegyszerűbb kereskedelmi mikrohullámú melegítőket használni, amelyeket az elmúlt években kiterjedten alkalmazták kísérleti célokra is, mint például HALL (1963), SALEK (1986), és JUDÁK, BEKE (1994) kísérleteiben. Ugyanakkor LI et al. (2011) részletes vizsgálatai alapján kijelenthető, hogy ezeknek a készülékeknek közös fogyatékosága az inhomogén mikrohullámú tér, az időben változó (pulzáló) teljesítmény, továbbá, hogy az energiafelhasználás hatékonysága nem mérhető.

Fontos a kísérletekben alkalmazott háztartási mikrohullámú berendezések működésének ismerete, mivel ennek hiánya már sok esetben hamis következtetésekre vezette a kutatásokat. A legnagyobb hiba, hogy a kezelőfelületen beállított értékeket veszik alapul a teljesítmény értékek meghatározásakor. Ez igaz lehet akkor, ha megfelelően hosszú a kezelési idő, de viszonylag rövid (néhány perces) szárítás esetén ez már nem így van. A háztartási berendezések teljesítményének szabályozása a magnetron be és kikapcsolási időintervallumok hosszának változtatásából áll, ezért bekapcsoláskor az energiaközlés során a magnetron teljes névleges teljesítménnyel dolgozik, míg a kikapcsolt állapotban nincs energiaközlés. Mivel az alkalmazott teljesítmény nagysága nagymértékben befolyásolja a vízleadási folyamatokat, ezért az így kapott eredményeket az átlagos teljesítményszintre vonatkoztatva hibás végeredmény adódik. Ennek kiküszöbölésére, kísérletei alapján GUNASEKARAN (1999) a be és kikapcsolási időszakok rövidítését javasolta, amely így az energia hasznosulását is javította.

A háztartási berendezésekkel szemben a korszerű kísérleti mikrohullámú berendezések már szabályozható magnetron teljesítménnyel rendelkeznek, különböző dielektromos tulajdonságú anyagok szárításakor a visszavert teljesítmény értéke beállítható és megfelelő műszerek csatlakoztatásával a valós bemenő teljesítmény pontos mérése is megoldott. Ilyen berendezést alkalmazott kísérletei során DUTTA et al. (2012).

2.4.3. Az egyenletes mikrohullámú tér biztosítása

A kezelőtér minősítéséhez a nagyfrekvenciás tér teljes leírása szükséges, amely elméletileg a vonatkozó Maxwell egyenletek felhasználásával elvégezhető, azonban ez a módszer multimódusú, bonyolult mezőstruktúránál (mint amilyen egy mikrohullámú kezelőtér) már igen nehézkes és körülményes. LUDÁNYI (2004) vizsgálatai alapján, lehetséges viszont mérni is a rezonátor valamely síkjában a téreloszlást és azt vizualizált mérésrel megjeleníteni. Amennyiben ehhez a fizikai modellhez olyan matematikai modellt illesztünk, amelynek számított értékei megadják a helytől függő teljesítménysűrűséget, a módszer alkalmazhatóvá válik a műszaki gyakorlatban.

A kapott eredmények azt bizonyítják, hogy a kereskedelmi mikrohullámú sütők általában nem megbízhatóak mikrohullámú kísérletekhez. Még viszonylag egységes elektromágneses mezővel rendelkező kezelőterek esetén is kialakulhatnak a szárítás során hideg és forró pontok, amelynek oka lehet többek között az anyagon belüli egyenlőtlen nedvességeloszlás, az anyag belső szerkezetének különbségei, vagy az anyag pozíciója a kezelőtéren belül. A forró pontok kialakulása nem kívánt anyagszerkezeti változást, pl. roncsolódást okozhat a szárított anyagban, ahogyan azt HOLTZ et al. (2010) is tapasztalta szárítási kísérletei során.

A szárított anyag túlmelegedése az élek mentén illetve az anyag sarkainál leggyakrabban az olyan esetekben fordul elő, amikor az anyag lapszerű, kocka vagy henger alakú, mert ilyenkor az anyag egynél több felületén történik az energiaközlés. Ennek hatása hasonló a hagyományos meleg levegős szárítás során tapasztaltakkal. Erre jó példa a burgonyakockák szárítása, amikor a kockák oldala gyorsabban szárad a túlmelegedés miatt és ez az anyag megbarnulását okozza. A mikrohullámú energiaközlés esetén ez a hatás sokkal erősebben jelentkezik. Ezt igazolta kísérleteivel BALL et al. (1993), amikor kísérleteiben műanyag csomagolású készételeket melegített mikrohullám segítségével. Az eredményei az mutatták, hogy az étel szélein az energiaelnyelés (és ezzel együtt a kialakult hőmérséklet is) több mint hétszer nagyobb volt a közepén mérhetőhöz képest.

A háztartási berendezésekkel szemben a korszerű kísérleti mikrohullámú berendezések már szabályozható magnetron teljesítménnyel rendelkeznek, különböző dielektromos tulajdonságú anyagok szárításakor a visszavert teljesítmény értéke beállítható és megfelelő műszerek csatlakoztatásával a valós bemenő teljesítmény pontos mérése is megoldott. Ilyen berendezést alkalmazott kísérletei során például DUTTA et al., (2012).

A megfelelő kísérleti berendezés fejlesztésének előzményeihez tartozik, hogy BOSISIO (1985) plazmatechnikai kutatásainak egyik eredményeként rendelkezésre állt olyan hullámillesztő adapter, amely alapjául szolgálhatott a terményszárítás speciális igényeinek kielégítésére.

A leggyakrabban alkalmazott mikrohullámú kísérleti berendezések legnagyobb problémája, hogy a nagyfrekvenciás (úgynevezett hangolt) tér technológiai jellemzői a kezelőtér kitöltöttségének is függvényei, ezért a minta tömegének megváltoztatása csak korlátozott mértékben lehetséges.

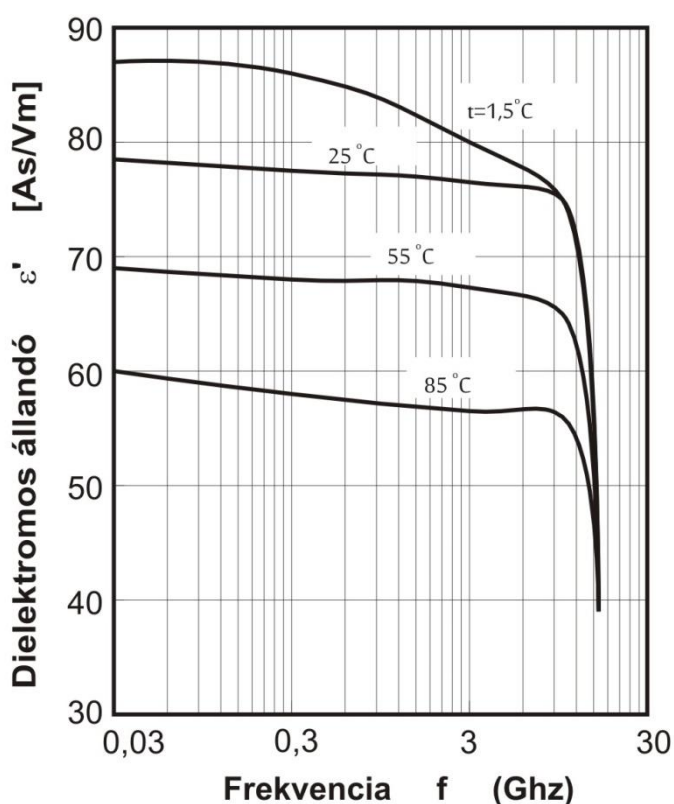
2.4.4. A száradó anyag viselkedése mikrohullámú térben

Amikor bizonyos nedvességtartalommal rendelkező anyag kerül elektromágneses térbe (ismerve a víz dipólusos tulajdonságát) az egyébként rendezetlen helyzetet elfoglaló ionok az elektromágneses mező irányába rendeződnek. Az ionok ütközése következtében kinetikus energiájuk hővé alakul. Ez egy kétlépcsős energiakonverziós folyamat: először az elektromos tér energiája alakul át a mozgó ionok kinetikai energiájává, majd többszörös ütközés folytán az ionok kinetikai energiája hővé konvertálódik. Ez a melegedési folyamat független a frekvenciától és csak kismértékben függ a hőmérséklettől. Az orientáció foka függ az orientáció sebességétől (ami frekvencia-függő) és a relaxációs időtől. Ez utóbbi a molekulák felépítésének

függvénye (méret, forma, stb.). Az orientáció foka a relaxációs frekvencia fölötti tartományban a frekvencia növekedésével csökken.

Az abszorbeált teljesítmény a frekvenciával lineárisan nő, az egy periódus alatt elnyelődött energia a frekvenciával rezonáns viselkedést mutat, maximumát pedig abban a pontban éri el, amelyben az alkalmazott frekvencia relaxációs frekvenciával egyező. A relaxációs frekvencia hőmérsékletfüggő. Minél magasabb a hőmérséklet, a dipólusok visszarendeződése annál gyorsabb és a relaxációs frekvencia pedig annál magasabb.

A víz viselkedése nagyfrekvenciás erőterben számos tanulsággal járhat, mivel a mikrohullám termikus hatásán alapuló dehidráció a száradó anyag nedvességtartalmához kötött. A szabad víz permittivitása a hőmérséklet és az alkalmazott frekvencia függvényében egyértelműen meghatározható (2.3. ábra). Látható, hogy a dielektromos állandó a hőmérséklet növekedésével csökken és 3 GHz alatt izotermikus viszonyok között közel állandó. Ez az elnyelt energia hasonló viselkedését is prognosztizálja. A szabad víz dielektromos tulajdonsága azonban csak az igen nagy víztartalmú anyagok viselkedéséhez nyújt támpontot.



2.3. ábra A szabadvíz permittivitása a hőmérséklet és az alkalmazott frekvencia függvényében

A víztartalmú anyagok elektromos permittivitása a rádiófrekvenciás tartományban elsősorban az elektromos vezetőképesség függvénye. A mikrohullámú tartományban a dipoláris rotáció játszik meghatározó szerepet, minden egyéb hatással szemben. A hőmérséklet emelkedése növeli az ionok mobilitását, ahogy növekszik az anyag rotációs és vibrációs energiája is.

NELSON (1987) szerint a dielektromos jellemzők változására jelentős hatással van a termény nedvességtartalma is. A nedvességtartalom növekedésével hatványozottan nő a dielektromos állandó értéke. Azonos nedvességtartalom és frekvencia tartományban a gabonafélék nem mutatnak egységes viselkedést, pl. a kukorica a búzánál kisebb dielektromos állandóval rendelkezik.

2.4.5. A szárított anyag minőségének kérdései

A folyamat-szimuláció és a -modellezés során a szárítmány minőségi kritériumai nem szerepelnek, holott gyakorlati jelentőségük nem vitatott. Ennek elsődleges oka, hogy az anyag minőségi jellemzői nehezen számszerűsíthetők közvetlen módon. Ugyanakkor a szárítástechnikai paraméterek kívánatos és megengedhető értékeinek, illetve a szárítmány minőségének elsődleges meghatározásához például kukorica esetén elegendő - a folyamat-, illetve egyes anyagjellemzők, valamint a mechanikai tulajdonságok kölcsönhatása ismeretében - a törékenység mérése. A törékenység függvényyszerű meghatározása egyszerűen és speciális felszerelés nélkül megoldható. Az eljárás lényege, hogy a törékenységet a szárítmány gömbalakúsága, aktuális nedvességtartalma, valamint a szárítóközeg hőmérséklete függvényében értelmezzük. Az egyenlet megoldása szempontjából egzaktabb megoldásra vezetne, ha a harmadik független változóként az anyag hőmérsékletét használnánk. BEKE, MUJUMDAR (1993) szerint a gyakorlati szárítás feltételei mellett azonban, az anyag hőmérséklete pontosan nem mérhető, másrészt a száradó anyag és a közeghőmérséklet között egyértelmű, lineáris kapcsolat mutatható ki.

Ugyanígy a szál as anyagok szárítása során sem tisztázott annak kérdése, hogy a megfelelő minőségű szárítmány eléréséhez, milyen technológiai paramétereket kell alkalmaznunk. Az anyag morfológiájából adódóan a leveles és szár részek nedvességleadási tulajdonságai is eltérőek, ezért a kezelési technológia megalkotásánál előtérbe kerülhet az ilyen felépítésű anyagok frakciónkénti (szár, levél) külön szárítása, amelyhez a feldolgozás első fázisában egy mechanikus szétválasztást kell alkalmaznunk.

2.4.6. A szárítási kísérletekben vizsgált növények

Végigtekintve a témában megjelenő publikációk listáján, elsőre azt gondolhatjuk, hogy a zöldségek, gyümölcsök mikrohullámú szárítása egy már kellőképpen alaposan feltárt terület. Ezeket a növényeket előszeretettel vizsgálják mivel magas kezdeti nedvességtartalmuk miatt ideális alapanyagoknak számítanak a mikrohullámú szárításhoz. A szárítási kísérletekben leggyakrabban a világ minden táján megtalálható zöldségfélék, például a burgonya (SINGH et al. 2013; SONG et al. 2009), a sárgarépa (WANG 2013; NAHIMANA és ZHANG 2011), és a gomba (DUTTA et al. 2012; GIRI és PRASAD 2007) jelennek meg. A gyümölcsök közül az alma (XU et al. 2012; Wu et al. 2010), a körte (ARBALLO et al. 2010; FUMAGALLI és SILVEIRA 2005) fordul elő leggyakrabban a mikrohullámú szárításban. Ezeknek a kutatásoknak azonban közös jellemzője, hogy a vizsgálatokat általában egy-két növényre végzik el és ezek alapvető paramétereit pl. a nedvességtartalom, a száradási sebesség változását, határozzák meg. Természetesen találhatunk ennél részletesebb vizsgálati módszert is. Ilyenkor az alapvizsgálatok mellett további, rendszerint a szárítmány minőségére vonatkozó vizsgálatokat végeznek, így tökéletesítve a szárítási folyamatot (ZHANG et al. 2010; RODRÍGUEZ et al. 2005) Ilyen esetekben a szárított anyag színét, zsugorodási tulajdonságait vizsgálják, és ebből vonnak le a minőségre vonatkozó következtetéseket. A másik kutatási irány a különböző száradási modellek érvényességének vizsgálata az adott növény esetére. Ennek során a szárítandó anyag tulajdonságait a konvektív szárításban már jól ismert száradási modellekkel, mint pl. a PAGE (1949) vagy LEWIS (1921) modellek, vizsgálják és ezeket a kísérleti eredmények alapján a mikrohullámú száradási folyamat jellemzőit figyelembe véve módosítják.

2.4.7. A mikrohullámú tér egyéb hatásai

LUDÁNYI (2004) kutatásai alapján felveti a mikrohullámú energia nem termikus hatásának hipotézisét. Egyrészt a kísérletek során az volt tapasztalható, hogy a nedvességtartalom egy része (különösen igen magas víztartalom mellett) halmazállapot-változás nélkül távozik, ami azt

eredményezte, hogy nedvesség a kezelőtér alján folyadék fázisban jelent meg. Másrésről a tényadatokból felállítva a folyamat energiamérlegét eredményként az egyenlettel definiált elmélet szerinti és a mért adatok halmazán megállapított energiafelhasználás között (a mért értékek javára) energiadeficit adódott. Ez utóbbi is azt támasztja alá, hogy a nedvesség egy része halmazállapot-változás nélkül távozik, ellentétben a klasszikus konvekciós szárításnál tapasztaltakkal. Ennek a jelenségnek a részletesebb vizsgálata mindenképpen fontos lépés lehet a nagy nedvességtartalmú anyagok mikrohullámú szárítási paramétereinek meghatározásában.

2.4.8. A mikrohullámú szárítás modellezése

A mikrohullámú vízelvonás kétségtelen elméleti előnyei a gyakorlatban még nehezen realizálhatók, mivel a többszörös energiakonverzió jelentős veszteséggel jár, illetve a folyamat energiaellátásához használható energiahordozók árfekvése eléggé kedvezőtlen. Ugyancsak akadályozza az elterjedést a folyamat nehézkes optimálhatósága és műszaki megvalósíthatósága is. A folyamat optimalizálása érdekében – elsősorban az elmúlt évtizedben – számos próbálkozás történt a mikrohullámú szárítás modellezésére, aminek két legfőbb sajátossága, hogy főként elméleti kiindulási bázissal rendelkeznek és főként homogén felépítésű anyagok vízvesztési folyamatát igyekeznek szimulálni.

Az első próbálkozások a mikrohullámú energia térbeli eloszlását a Lambert-féle törvény felhasználásával kísérelték meg leírni. Minthogy az említett törvény eredeti formájában végtelen feltételekre érvényes, változatlan formában nem hozott pontos eredményt a mikrohullámú szárítás esetére. Ezért az elméleti próbálkozások nagyobbik része a Maxwell-egyenletekre épült, amely homogén dielektrikumra elfogadható eredményt adott (AYAPPA 1997).

Számos publikáció született olyan numerikus modellek felépítésére, amelyek a mikrohullámú szárítást szimultán hő- és anyagtranszportként kezelték. Az egyik legsikerültebb modellt LIAN et al. (1997) készítette a porózus anyagok mikrohullámmal segített vákuumszárítására.

A modell alapja, hogy a vízelvonás során folyadék és gőz halmazállapotú nedvességmozgást tételeztek fel. A komponenstranszport leírására – elsősorban a Darcy-törvényre alapozva – az alábbi vezéregyenletet állították fel:

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \nabla(D_w \cdot \nabla X) + \nabla(D_g \cdot \nabla T), \quad (2.42)$$

ahol: D_w - a folyadék diffúziós tényezője [m^2/s],
 D_g - a gőz diffúziós tényezője [m^2/s],
 T - az abszolút hőmérséklet [K].

A jobboldali második tag az anyagtranszporttal társult hőátvitelt veszi figyelembe.

A hőátvitel leírására mérlegegyenletet használtak az alábbi formában:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} - L \cdot \rho_w \cdot \frac{\partial X}{\partial \tau} = \nabla[(\lambda_T + c_w \cdot D_g) \cdot \nabla T] + \nabla(c_w \cdot D_g \cdot \nabla X) + Q, \quad (2.43)$$

ahol: λ_T - hővezetési tényező,
 Q - a disszipált mikrohullámú energia által generált hő.

A numerikus megoldáshoz szuperszámítógépre volt szükség és tézta mikrohullámú vákuum szárítására elfogadható pontosságú eredményt adott. Megjegyzendő, hogy a modell felírásakor a száradás során bekövetkező zsugorodást nem vették figyelembe.

Ugyancsak ennek a modellnek az energiaátadásra felírt, de egyszerűsített formáját alkalmazta ARBALLO et al. (2010) szárítási kísérleteiben, amelynek során körte szeleteket száradási

tulajdonságait vizsgálták mikrohullámú térben. Az egyszerűsített egyenletet a következő formában használták:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\tau} = \nabla[\lambda_T \cdot \nabla T] + Q. \quad (2.44)$$

A megszakításos mikrohullámú szárítás modellezésére ZHANG, MUJUMDAR (1992) a véges elem módszert sikerrel alkalmazta. A bázisegyenletet az irreverzibilis termodinamika elméletére alapozták.

$$c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_T \cdot \nabla^2 T + K \cdot \varepsilon_a \cdot \nabla^2 U + Q, \quad (2.45)$$

$$c_w \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} = K_w \cdot \nabla^2 T + K_w \cdot \nabla^2 U, \quad (2.46)$$

ahol:

λ_T	- a hővezetési tényező,
ε_a	- a tér elektromos permittivitása,
K	- a permeabilitás,
U	- a nedvességpotenciál.

SANGA, MUJUMDAR, RAGHAVAN (2000) hat, meglehetősen bonyolult kezdeti és peremfeltétel előírásával lefuttatott modell adatait összevetve más, hasonló eljárásokéval nem elhanyagolható eltérést tapasztaltak.

Hasonló elméleti alapra építve véges differenciál módszer alkalmazva kereskedelmi mikrohullámú sütőben történő melegedési folyamatot szimuláltak többfázisú anyagmozgást feltételezve. Egyszerűsítés céljából első közelítésben a konvekciós hatásokat figyelmen kívül hagyták. Ezzel együtt a modell futtatásához szuperszámítógépre volt szükség. A tanulmány fő eredménye, hogy teoretikus alapon megoldotta a többfázisú anyagtranszport numerikus modellezését. Egyben arra a következtetésre jutottak, hogy mikrohullámú energiaátvitel esetén a konvekciós hatás nem számottevő.

Hasonló szerkezetű modellt publikált pl. TURNER, JOLLY (1991) is. Az említett modellek eredményeinek érdemi összevetése azonban nehézkes, mert jelentős különbségek voltak a megvalósítás körülményeiben.

Ugyancsak többféle, szám szerint 9 modell részletes összehasonlító vizsgálatát végezte el SUTAR, PRASAD (2007), amelynek során mikrohullámú vákuumszárítást alkalmazva, többféle nyomást és magnetron teljesítményt használtak. A nedvességtartalom megadására vonatkozó modellek közül a legpontosabbnak a PAGE (1949) által felállított összefüggés bizonyult.

A modellezési kutatásoknak azonban nem elhanyagolható eredménye az, hogy segítségükkel körvonalazható egy-egy hatékony nedvesség-elvonási eljárás. Általános konklúzióként elfogadható, hogy a modellezésben ez elméleti kiindulás főleg az iparban, a homogén belső szerkezetű anyagok esetében és akkor használható, ha a tér perturbáció elhanyagolható. A másik jelentős megállapítás az lehet, hogy a közeljövőben elsősorban a hibrid szárítási technológiák fejlesztése táplálja legjobban a gyakorlati siker reményét.

2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A szakirodalmi áttekintés során elsőként megvizsgáltam a száradó anyag jellemző vízleadási folyamatait és az ezeket leíró összefüggéseket. Ezen belül tanulmányoztam a szorpciós izotermák elméletét és a víztárolás fizikai hátterét. A folytatásban megvizsgáltam a számos, különböző szárítási esetre vonatkozó, nedvességtartalom meghatározására szolgáló egyensúlyi

modellt. A biológiai anyagokra vonatkozóan az irodalomban számos szorpciós és deszorpciós elmélet jelent meg. Ezek közül néhány nagy pontossággal írja le a termény száradását és visszanedvedését. Ennek ellenére csak meghatározott relatív nedvességtartalom és hőmérséklet tartományra érvényesek. Az egyensúlyi nedvességtartalom adatainak meghatározását nagymértékben bekorlátozzák a meghatározásuk közben elkövetett gyakorlati hibák. Ezen problémák kiküszöbölésére jelenleg a tisztán kísérleti modell a legjobb eszköz az egyensúlyi nedvességtartalmi értékek meghatározásához. Ugyanakkor elmondható, hogy a szárítási folyamatok megismerésének alapját jelentő kutatások a mai napig aktívan folynak, mivel számos területen még csak részeredményeket sikerült elérni. Véleményem szerint az egyik ilyen területnek számít a mikrohullámú szárítás témaköre, ezért a továbbiakban ennek a kutatási területnek az eddig elért eredményeit tekintetem át.

A mikrohullámú szárítási folyamatok tanulmányozása során elsőként a területre vonatkozó alapvető összefüggéseket tekintetem át, amelynek eredményeként elmondható, hogy a száradó anyagok dielektromos tulajdonsága az anyagi tulajdonságok és a folyamatjellemzők összetett kapcsolataként alakul, így a klasszikus hő és anyagátviteli elmélettel nehezen írható le. További probléma, hogy az eddig megjelent tanulmányokban konstans és alacsony (rendszerint szoba) hőmérsékleten vizsgálták az anyagjellemzőket. Kérdéses azonban, hogy a szárítás közben változó hőmérséklet és nedvességtartalom értékek mellett mennyire használhatók az eddigi megállapítások.

A mikrohullámú szárítási kísérletek elméletének áttekintése után a kísérletek gyakorlati megvalósításának lehetőségeit összegeztem. Ennek során összegyűjtöttem azokat a legfontosabb tulajdonságokat, amelyek a kísérleti berendezések kialakítása során fontos szerepet játszanak. A berendezésekkel kapcsolatban kijelenthető, hogy a háztartási készülékek kísérletekben történő alkalmazása nem célravezető, mivel a beállítási, szabályozási és a legalapvetőbb folyamatjellemzők mérési lehetősége nagymértékben korlátozott. Ezeket a hiányosságokat egy korszerű kísérleti berendezés alkalmazásával ki lehet küszöbölni, így olyan vizsgálatok végezhetők, amelyek eredményei megbízható alapot szolgáltatnak a további kutatásokhoz.

A másik fontos eleme a szárítási folyamatnak maga a szárítandó anyag, így összegeztem az anyag viselkedésére vonatkozó kutatásait a mikrohullámú térben. Kijelenthető, hogy a termények nem homogén dielektrikumok, ezért sajátos agrofizikai tulajdonságaik számottevően befolyásolják a mikrohullámú térrel szembeni viselkedésüket, és jelentősen bonyolítják az egyes folyamatok matematikai megfogalmazhatóságát. A folyamatleíró egyenletek pontosítása végett indokoltnak tűnik legfontosabb növényeink pl. zöldségnövények vizsgálata a nagyfrekvenciás erőterben, változó mikrohullámú teljesítmény alkalmazásával. Ezzel várhatóan megállapítható, hogy milyen eltérések mutatkoznak a száradó anyag viselkedésében a mikrohullámú mezőben a konvektív vízelvonáshoz képest, továbbá az is, hogy ez milyen hatással van a vízleadás folyamatára.

Az anyag jellemzőinek bemutatása mellett megállapítottam, hogy a mikrohullámú szárítási kísérletekben számos, egymástól sok tekintetben különböző (pl. nedvességtartalom, szövetszerkezet, morfológia) növény száradási tulajdonságát vizsgálták. A vizsgálatok közös jellemzője, hogy önállóan kezelik a növényeket, így határozva meg azok vízleadási jellemzőit. Ezek alapján kijelenthető, hogy a mikrohullámú szárítás területén hiányoznak az olyan jellegű vizsgálatok, ahol többféle növény vagy növénycsoport vizsgálatát együttesen végzik, így adva részletes leírást a teljes csoport közös jellemzőire.

Az előzőekben összefoglalt megállapításokat szem előtt tartva, egy olyan vizsgálat sorozat megvalósítását terveztem meg, amelyben azonos morfológiai csoportba tartozó zöldségnövények egyéni és csoportra jellemző mikrohullámú száradási tulajdonságait vizsgálhattam, eltérő mikrohullámú teljesítmény szinteken. Ehhez olyan kísérleti szárító berendezést alkalmaztam, amely biztosítja a legfontosabb folyamatjellemzők megbízható mérését és az adatok rögzítését.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az egyes növénycsoportok száradási tulajdonságainak meghatározásához laborkísérleteket végeztem. A kísérletek helyszíne a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézetének Hőtechnikai laborja volt. A kísérletek során több különböző morfológiai tulajdonságú növénycsoportot vizsgáltam.

3.1. A vizsgált növényfajták

A kísérleteimben 2 eltérő tulajdonságokkal rendelkező, nagy kezdeti nedvességtartalommal rendelkező növénycsoportot vizsgáltam. Ezeket a SZIE Kertészeti Tanüzeméből szereztem be.

3.1.1. Burgonyafélék (*Solenaceae*)

A *burgonyafélék* családjába tartozó növények száma 2300, ezek nagyobb része lágyszárú, ritkább esetben cserjék vagy fák. A család képviselőinek legnagyobb része a trópusokon (Közép- és Dél-Amerika) található. Virágaik magánosak vagy kevés virágú bogernyőben állnak. A virágzat alakja változatos (tölcsér, harang, bögre, stb.). Termésük tok vagy bogyó. (TURCSÁNYI, 1995)

A *burgonyafélék* közül a következő növényeket vizsgáltam:

- burgonya (*Solanum tuberosum*)
- paradicsom (*Lycopersicon esculentum*)
- paprika (*Capsicum annuum*)
- padlizsán (*Solanum melongena*)

3.1.2. Ernyősök (*Umbelliferae*)

A sok nemzetségből álló család fajainak száma közel 3000, melyek többnyire lágyszárúak. Főleg az Egyenlítőtől északra fekvő, mérsékelt klímájú területek növényei. Legfontosabb jellemzőjük az egyszerű vagy összetett ernyős virágzat. A termésük a jellegzetes ikerkaszat, amelynek két felét terméstartó tartja össze. A termésfalakban olajjártatok vannak, de többnyire a növények minden része gazdag hasadási illóolaj-jártatokban. Ennek következtében sok fajuk fűszernövényként használatos vagy az illóolaj-előállításban jelentős.

Az *ernyősök* családjából a *zellerfélék* alcsaládjának tagjait vizsgáltam. Az alcsaládban olyan növények is megtalálhatóak, amelyeknek gyökere és levelei is ételízestítőként hasznosíthatóak. (TURCSÁNYI, 1995)

A gyökér felhasználású növények közül a következőket vizsgáltam:

- zeller (*Apium graveolens*)
- petrezselyem (*Petroselinum crispum*)
- paszternák (pasztinák) (*Pastinaca sativa*)
- sárgarépa (*Daucus carota*)

A levél felhasználású növények közül a következőket vizsgáltam:

- zeller (*Apium graveolens*)
- petrezselyem (*Petroselinum crispum*)
- kapor (*Anethum graveolens*)

3.2. Az alkalmazott mérőberendezés

Számos mikrohullámú szárítási kísérletben az háztartásokban előforduló, hagyományos, mikrohullámú berendezéseket alkalmaztak, de ezek, mivel nem mérési céllal készültek számos problémát jelentettek a mérési eredmények kiértékelése során. A legfőbb problémát a hasznosított energia folyamatos meghatározása jelentette, de a homogén mikrohullámú tér kialakítása és az egyenletes teljesítményszint biztosítása sem volt megoldható. Ráadásul a mikrohullámú szárítás során a behelyezett anyag mennyiségétől, nedvességtartalmától és számos egyéb tulajdonságától függően befolyásolja a kialakuló mikrohullámú teret.

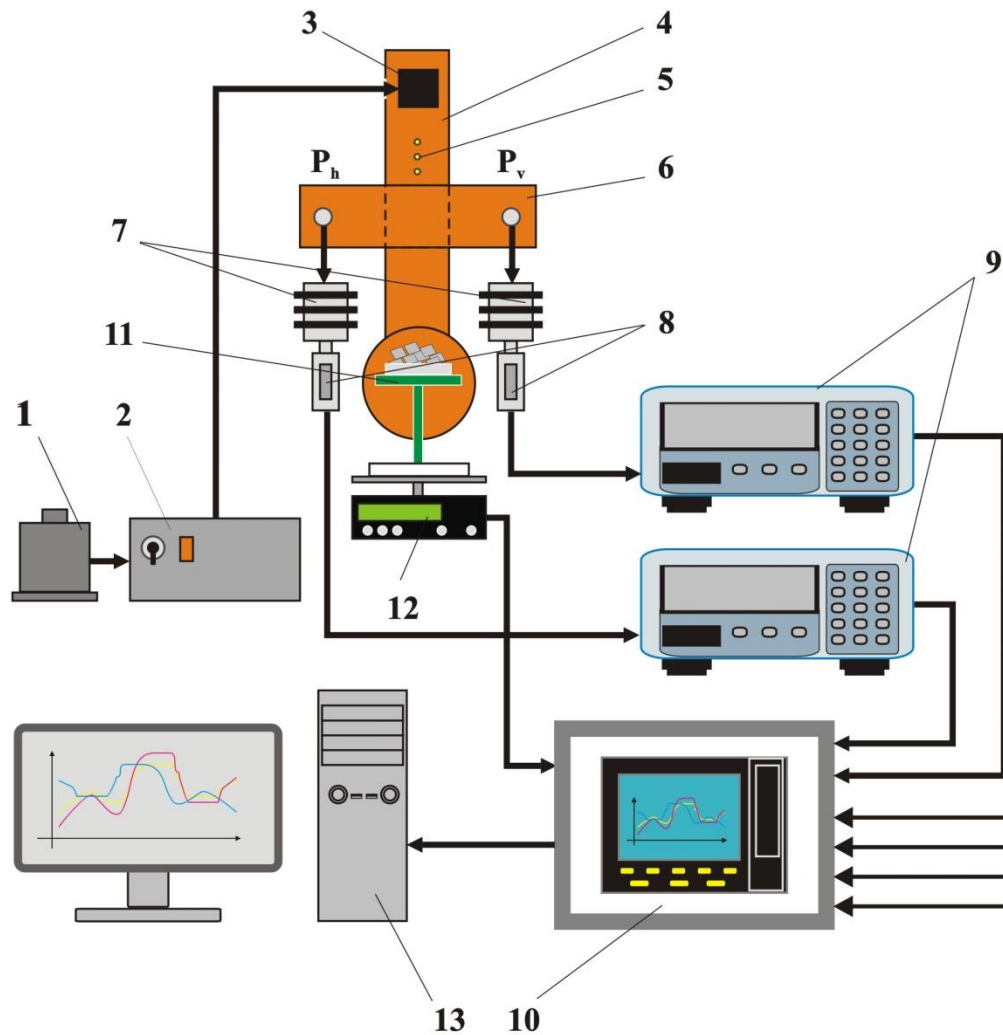
Ezen problémák kiküszöbölésére egy kifejezetten a mikrohullámú szárítási kísérletekhez kifejlesztett berendezést használtam. A berendezés kialakításakor fontos szempont volt a száradási folyamat energetikai mutatóit mérhetővé lehessen tenni, így a berendezés alkalmas a haladó és visszavert irányú teljesítménykomponensek mérésére. Ezen felül mivel a statikus üregrezonátorban a kialakuló tér a kezelőtér geometriájának függvényében ún. inhomogén multimódusú teret eredményez, a berendezésben dinamikus mikrohullámú tér alakítható, amivel elérhető az üregrezonátor majdnem egyenletes behangolása. Ez azért fontos, mert a kísérletben alkalmazott anyagok a kezelőtérbe helyezéssel - a mennyiségtől függően kisebb vagy nagyobb mértékben – módosítják a nagyfrekvenciás teret. A dinamikus erőtér alkalmazásával ez a probléma kiküszöbölhető. Természetesen ebben az esetben is szükség van az egyes mérések megismételhetőségének és a kapott eredmények összevethetőségének érdekében a kezelőtér energiaeloszlásának meghatározására. Ezek alapján a minták megfelelő pozicionálásával elérhető, hogy a behelyezett anyagmennyiség csak a legkisebb mértékben módosítsa a mikrohullámú teret. A mikrohullámú szárítóberendezés felépítése a 3.1. ábrán látható, amelynek fontosabb tulajdonságai a következők (LUDÁNYI, 2004):

- 230 V/50 Hz villamos hálózati csatlakozás,
- a szabványos 2,45 GHz-es üzemi frekvencia,
- fokozatmentes teljesítményszabályozási lehetőség a 100 W – 700 W-ig terjedő tartományban,
- a rezonátorkamrához illeszkedő iránycsatolók segítségével a haladó (P_h) és visszavert (P_r) teljesítmények folyamatos mérése a szárítási folyamat alatt,
- a szárítókamrában egyenletes elektromágneses tér biztosítása,
- számítógépes csatlakozási lehetőség a folyamatos adatgyűjtéshez.



3.1. ábra A mikrohullámú szárítóberendezés

A mérőrendszer működési vázlatát a 3.2. ábrán látható.



3.2. ábra A mikrohullámú mérőrendszer működési vázlatát

- (1) toroid transzformátor, (2) tápegység, (3) magnetron (4) csőtápvonal, (5) hangoló szondák, (6) csatolórés, (7) 20dB-es csillapítás, (8) teljesítménymérő szondák, (9) teljesítménymérő műszerek, (10) többcsatornás adatgyűjtőegység, (11) mintatartó, (12) labormérleg, (13) kiértékelő számítógép

A mérések során az első lépés toroid transzformátor (1) feszültség szintjének beállítása, amellyel a magnetron teljesítményét lehet szabályozni. A beállítás után a tápegységen (2) elhelyezett főkapcsoló segítségével indítható a magnetron (3). A mikrohullámú energia a függőleges téglalap keresztmetszetű csőtápvonalon (4) jut a kezelőtérbe. Ebben a csőtápvonalban kerültek elhelyezésre azok a hangoló szondák (5), amelyek megakadályozzák a magnetron irányában a káros visszaverődést. A csőtápvonalra merőlegesen elhelyezett csatolórésen (6) keresztül kerül kicsatolásra a haladó (P_h) és a visszavert (P_v) irányú mikrohullámú teljesítmény. Az iránycsatoló csatolási tényezője 28 dB. Az iránycsatoló utáni teljesítmények azonban még mindig túl nagyok ahhoz, hogy egyenesen a teljesítménymérő műszerekbe vezessük, ezért szükség van egy fix mértékű 20 dB értékű csillapításra (7), amelyet a teljesítménymérő szondák (8) elé kell bekötni. A teljesítménymérő műszerek (9) alakítják a csökkentett mikrohullámú teljesítményt elektromos jelekké, amelyeket a többcsatornás adatgyűjtőegység (10) rögzít. Ugyancsak az adatgyűjtőbe kerülnek a kezelőtérben található mintatartóban (11) elhelyezett anyag tömegvesztésének adatai is, amelyet egy labormérleg (12) segítségével mértem. Ezen felül termoelemek segítségével

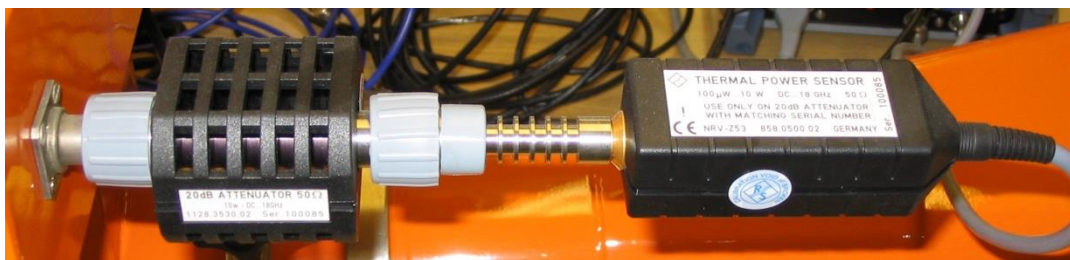
mértem a labor, a kezelőtér be- és kilépő, illetve a magnetron hűtőlevegőjének hőmérsékletét is. Az adatgyűjtő adatait végül számítógépen (13) dolgoztam fel.

3.3. A szárítási kísérletek során használt műszerek

A mérés során felhasznált eszközök mindegyike a Folyamatmérnöki Intézet Hőtechnikai laborjának felszereléséhez tartozik. A 3.2. ábra szerinti mérési elrendezésben szereplő mikrohullámú berendezés és a hozzá tartozó toroid transzformátor (1) és tápegység(2) egyedi gyártású berendezés, ezért a mérőrendszer további részeit ismertetem.

NRV-Z53 Mikrohullámú teljesítménymérő szonda a 20dB-es fix csillapítóval (3.3. ábra) (Rohde&Schwarz GmbH&Co., Németország) A mikrohullámú teljesítmény méréséhez 2db (haladó és visszavert irányú) teljesítménymérő szonda került beépítésre, amelyekhez a mérendő teljesítményszint nagyságának megfelelő fix 20dB-es csillapítás szükséges. Az NRV-Z53-as mérőszondát csak ezzel a csillapítással együtt lehet alkalmazni. A mérőszonda fontosabb műszaki jellemzői:

- alkalmazható frekvencia tartomány DC-40 GHz,
- teljesítménymérési tartománya 100 pW-tól 30 W-ig,



3.3. ábra NRV-Z53 Teljesítménymérő szonda (jobb oldalon) a 20dB-es fix csillapítóval

NRVS Mikrohullámú teljesítménymérő (3.4. ábra) (Rohde&Schwarz GmbH&Co., Német-ország) A mikrohullámú teljesítmények mérésére és az adatgyűjtő felé továbbítására 2 db (haladó és visszavert irányú) NRVS típusú teljesítménymérőt használtam. A teljesítménymérő jellemző mérési tulajdonságai:

- alkalmazható frekvencia tartomány DC-40 GHz, (az alkalmazott mérőfejtől függően)
- teljesítménymérési tartománya 100 pW-tól 1 kW-ig terjed (az alkalmazott mérőfejtől függően)
- automatikus frekvenciafüggő korrekció
- csillapítás korrekció
- beépített átlagoló szűrő kézi és automatikus mérési üzemmódban



3.4. ábra NRVS Mikrohullámú teljesítménymérő

Logoscreen adatgyűjtő egység (3.5. ábra) (JUMO GmbH & Co. KG, Németország) A mért teljesítmény és hőmérsékletadatokat a 12 mérési csatornával rendelkező Logoscreen adatgyűjtő egység segítségével rögzítettem. Az adatgyűjtő már a mérések alatt képes megjeleníteni a mért adatokat, illetve az összegyűjtött adatok a saját kiértékelő szoftverének (PCA) segítségével többféle általánosan használt adatformátumban (.xls, .txt) menthetők. Az adatgyűjtő fontosabb jellemzői:

- 12 mérési csatorna,
- a beépített memóriában 350 000, a külső adattárolón 650 000 adat rögzíthető,
- mintavételi sűrűség 125 msec és 32767 sec között 1 msec-os lépésközzel állítható
- többféle adatgyűjtési módozat (minimum, maximum, átlag),
- hangjelzés a beállított határérték elérése esetén,
- valós idejű adatmegjelenítés egy 320 x 240 pixeles kijelzőn.



3.5. ábra Logoscreen adatgyűjtő egység

Bizerba GE 2000-65 digitális labormérleg (3.6. ábra) (Bizerba GmbH & Co. KG, Németország) A szárítás során bekövetkező tömegvesztés meghatározásához egy 0,01 g pontosságú digitális labormérleget használtam. A mérleg egy RS 232 porton keresztül alkalmas a mérési adatokat az adatgyűjtőnek továbbítani. A mérleg legfontosabb műszaki paraméterei:

- mérési pontossága 0,01 g
- minimális mért tömeg 0,5 g
- maximális mért tömeg 2000 g



3.6. ábra Bizerba GE 2000-65 digitális labormérleg

3.4. A vizsgálati minták előkészítése

A vizsgált mezőgazdasági eredetű anyagok eltérő morfológiai tulajdonságúak, ezért a minták előkészítése teljesen azonos módon nem megoldható. Ugyanakkor az egyes növénycsoportok vízleadási tulajdonságainak összehasonlításához, a kísérleteket a lehető legkevesebb eltéréssel kell elvégezni. Ezt a célt szem előtt tartva a minták előkészítésekor arra törekedtem, hogy a minták legnagyobb mérete ne haladja meg az 1 cm-t. A minták homogenizálása érdekében mindig több növény került felaprításra.

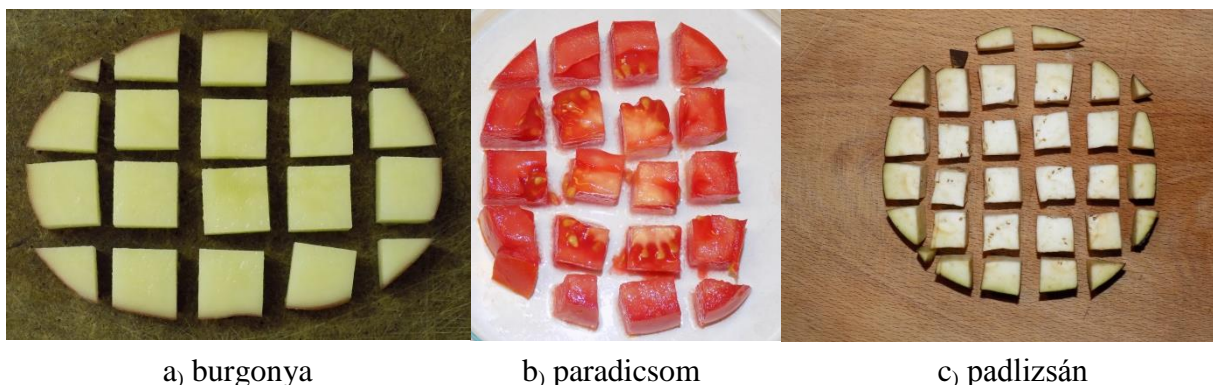
3.4.1. A burgonyafélék előkészítése

A *burgonyafélék* csoportjába tartozó növények közül, a kísérletek során a burgonyát, a paradicsomot, a padlizsánt, és a paprikát vizsgáltam. Ezek mindegyike magas kezdeti nedvességtartalommal rendelkezik (az egyes növények nedvességtartalom értékeit a 3.1. táblázat mutatja be) és a termények mérete is közel azonosnak tekinthető, ezért az előkészítésük is hasonlóan történt.

3.1. táblázat Burgonyafélék kiindulási nedvességtartalmai

Növény	Kezdeti nedvességtartalom w [%]	
	minimum	maximum
Burgonya	79,38	83,09
Padlizsán	90,53	92,89
Paprika	93,81	94,84
Paradicsom	94,41	95,64

A terményekből 1 cm vastagságú szeleteket készítettem, majd a szeleteket 1 x 1 cm-es darabokra vágtam. Mivel a szeletek formája igazodik a vizsgált növény alakjához, így a szélső részek alakja nem volt tökéletes kocka alakú (3.7. ábra), de ezeket a részeket is felhasználtam a mérés során.



a) burgonya

b) paradicsom

c) padlizsán

3.7. ábra A burgonyafélék előkészítése

A paprika termése kissé eltér az előző 3 növénytől, amelyek viszonylag homogén kitöltöttséget mutatnak. A paprika egy vastag termésfalból áll, de ezen belül már csak a magház található, ezért ebben az esetben a mintakészítést is módosítanom kellett. A magházat eltávolítottam, majd a megmaradt részt 1 cm vastagságú hosszirányú szeletekre vágtam. Végül ezeket a szeleteket vágtam fel 1 cm hosszúságú darabokra (3.8. ábra).



3.8. ábra A paprika előkészítésének folyamata

3.4.2. Az ernyős gyökérzöldségek előkészítése

Az ernyősök családjába tartozó gyökérzöldségek közül a paszternákot, a petrezselymet, a sárgarépat és a zellert vizsgáltam, ezek kiindulási nedvességtartalma a 3.2. táblázatban látható.

3.2. táblázat A gyökérzöldségek kiindulási nedvességtartalmai

Növény	Kezdeti nedvességtartalom w [%]	
	minimum	maximum
Paszternák	79,88	82,14
Petrezselyem gyökér	81,19	85,71
Sárgarépa	87,71	91,70
Zeller gyökér	88,95	91,79

A vizsgált gyökérzöldségek morfológiai tulajdonságai csak kis mértékben térnek el egymástól, ezért itt a mintakészítés folyamata azonos volt. A növényről először eltávolítottam a levél részeket, majd a gyökérrészről levágtam a vékonyabb gyökereket is. A megmaradt főgyökeret 1 cm vastag szeletekre vágtam, majd ahol erre lehetőség volt (1 cm-t meghaladó átmérő esetén) a szeleteket 1 cm oldalhosszúságú kockákra vágtam (3.9. ábra). Ahol az átmérő kisebb volt, mint 1 cm, ott a szeletet egészben hagytam.



3.9. ábra A gyökérzöldségek előkészítési folyamata

3.4.3. Az ertyős növények levélzetének előkészítése

Ebben a csoportban 3 féle növényt vizsgáltam, a zeller, a petrezselyem és a kapor levelét. A vizsgált növények nedvességtartalma ebben az esetben is közel azonos volt. Az egyes nedvességtartalom értékek a 3.3. táblázatban láthatók.

3.3. táblázat A levélzöldségek kiindulási nedvességtartalmai

Növény	Kezdeti nedvességtartalom w [%]	
	minimum	maximum
Kapor	88,72	89,96
Petrezselyem levél	79,28	80,28
Zeller levél	83,44	85,52

A levélzöldségek előkészítése minden növényfajta esetében azonos módon történt. Elsőként a levágott levélrészekről eltávolítottam az esetleg még megmaradt gyökérrészeket, majd a leveleket a levélnyéllel együtt 1 cm hosszúságú darabokra szeleteltem. A nagyobb levélrészeket (pl. zeller esetében) kereszt irányban is méretre vágtam. Példaként a 3.10. ábrán a kapor előkészítése látható.



3.10. ábra A kapor levelének előkészítése

3.5. A szárítási kísérletek

A 3.2. pontban már említett, a mikrohullámú tér egyenletlenségeire vonatkozó, problémák kiküszöbölése miatt fontos, hogy a szárítótérben elhelyezett anyagot a lehető legegyszerűbb teljesítmény-eloszlású térben kezeljük, mert így elkerülhető, hogy a termék egyes részei nem száradnak megfelelően, míg más részeken túlszáradás (esetleg megégés) jöjjön létre.

3.5.1. Az optimális szárítási pozíció meghatározása

A mikrohullámú szárítóberendezés kezelőterében kialakuló nagyfrekvenciás erőtér egyértelműen leírható a Maxwell egyenletek segítségével, ugyanakkor multimódusú terek esetén az egyenletek felírása már nem egyszerű feladat. Ennek ellenére lehetőség van arra, hogy a kialakuló téreloszlást, illetve teljesítménysűrűséget megállapítsuk (LUDÁNYI 2004).

A minták kezelőterében történő pozicionálására kísérleteket végeztem (3.11. ábra), amelyekhez a mintatartóként használt Petri-csészék méretéhez igazodó indikátorlapokat készítettem. Ezeket az indikátorlapokat Kobalt(II)-klorid (CoCl_2) vizes oldatába mártottam, majd a kezelőterbe helyeztem és kiszáritottam. A CoCl_2 vizes oldata rózsaszín árnyalatú, de hő hatására kékké változik, ezért alkalmas a helyi forrópontok meghatározására. Azokon a helyeken, ahol a kezelőterben nagyobb a teljesítménysűrűség, nagyobb a túlmelegedés is. Ezt az indikátorlapon a sötétkék szín jelzi. A kísérleteket több magassági beállításnál elvégeztem és megállapítottam a mintatartó optimális helyzetét a kezelőterben. A későbbi - már anyagmintákkal végzett - kísérleteimben, minden esetben ezt a magassági beállítást használtam.



a) CoCl_2 vizes oldata

b) az indikátorlap előkészítése

c) a kiszáritott indikátorlap a túlhevülést mutató részekkel

3.11. ábra Az energiasűrűség meghatározása a szárítótérben

3.5.2. A mérési folyamat

A kísérletek során a 3.4. pontban leírtak szerint előkészített anyagmintákat vizsgáltam. A mérésekhez a kezelőtér 125 mm-es átmérőjéhez méretben igazodó, 105 mm átmérőjű Petri-csészéket használtam. A csészék tömege 110 és 125 g között volt. A Petri-csészék mérete meghatározta a kezelőtérbe behelyezhető anyagmennyiség nagyságát. Az anyagot szabályos elrendezés nélkül halmoztam a csészékre (3.12. ábra), így biztonsággal (a lehullás, kiborulás veszélye nélkül) a *burgonyafélék* és a *gyökérzöltségek* esetében 80 g volt behelyezhető, ami a mintatartó fölötti üres mikrohullámú mintatér teljes térfogatához viszonyítva 0,25-os térkitöltési mutatóval jellemezhető. A *leveles* anyagok esetén 25 g töltet volt behelyezhető, ami a lazább anyagalmaz miatt 0,51-os térkitöltésnek felelt meg.



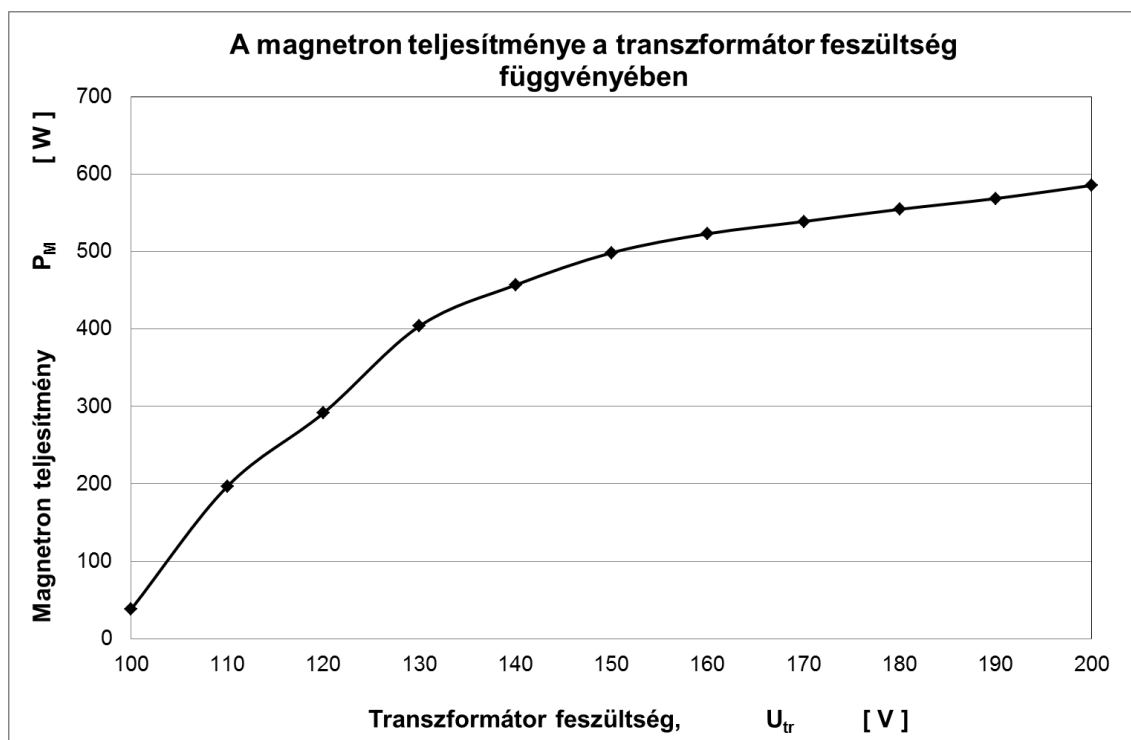
a.) burgonya

b.) sárgarépa

c.) petrezselyem levél

3.12. ábra A szárításra előkészített növényminták

A mintatömegekhez alkalmazható teljesítményszinteket és a hozzájuk tartozó kezelési időket minden növény esetében próbamérések segítségével határoztam meg. Mivel legalább 3 teljesítményszinten kívántam megismételni a méréseket így a toroid feszültség módosítására bekövetkező magnetron teljesítményváltozást (3.12. ábra) is figyelembe vettem a beállításoknál. A berendezés tulajdonságaiból adódóan, az alkalmazott teljesítmény felső határát a behelyezhető anyag mennyisége szabta meg. A 180 V feletti tartományban már sok esetben megpörkölődött az anyag, a nagy teljesítmény hatására, ezért a további beállításokat ez alatt határoztam meg. A fentieket figyelembe véve a kísérletek során a *burgonyafélék* és *gyökérzöldségek* esetében, az alkalmazott toroid transzformátor feszültséget 140, 160 és 180 V-os értékre állítottam be.



3.13. ábra A magnetron teljesítményének változása az alkalmazott transzformátor feszültség függvényében

A beállított feszültséghez tartozó magnetron teljesítmény értékeket a 3.4. táblázat tartalmazza.

3.4. táblázat Az egyes toroid feszültséghez tartozó magnetron teljesítmény értékei

Toroid transzformátor feszültsége	Magnetron teljesítmény
140 V	456,8 W
160V	523 W
180V	554,6 W

A könnyebb azonosíthatóság végett a később bemutatásra kerülő mérési eredményeket is ezen teljesítményszinteknek megfelelően jelöltem. A kezelési idő a 456,8 W-os szinten - növénytől függően - 26-37 perc között, a 523 W-os szinten 18-22 perc között, míg a 554,6 W-os szinten 12-14 perc között változott. A *leveles* anyagokat kontroll vizsgálatként szárítottam, ezért csak a 523 W-os szinten szárítottam, ahol egységesen 11 perces kezelési időt alkalmaztam.

Az egyes szárítás kísérletek lebonyolítása azonos módon történt. Elsőként az adott növénynek megfelelő tömegű mintákat kimértem, majd a kezelőtérbe helyeztem. A kezelési idő letelte után a mintákat kivettem a kezelőtérből és szárítószekrény segítségével az egyensúlyi nedvességtartalomig szárítottam a vonatkozó szabványok szerint (ASAE S358, 103 °C hőmérsékleten, 24 óra időtartamig), majd újra lemértem. Minden mérési beállítást 5 alkalommal végeztem el. A teljesítményadatokat (haladó és visszavert irányú) minden mérési ciklusban 5 másodpercenként rögzítettem. A tömegvesztést a *burgonyafélék* és a *gyökérzöldségek* esetén, a 456,8 W-os és 523 W-os szinten 1 percenként, míg a rövidebb kezelési idők miatt a 554,6 W-os szinten és a *leveles* növények esetében fél percenként rögzítettem. A próbamérések során kismértékű kondenzációt tapasztaltam, ami főleg a magasabb nedvességtartalmú anyagok szárítása során jelentkezett. Ennek kiküszöbölésére egy ventilátort szereltem a csatorna végére, amely 0,3 m/s sebességű légáramot biztosított. Ez elegendőnek bizonyult a kondenzáció megszüntetésére, ugyanakkor a be és kilépő levegő entalpiájának értékét nem befolyásolta. A szárítótér be- és kilépő levegő hőmérséklete mellett, rögzítettem a labor és - a berendezés biztonságos üzemeltetése végett - a magnetron hűtőlevegőjének hőmérsékletét is. Ezeket az adatokat is 5 másodperces időközlel gyűjtöttem össze.

3.6. A kiértékelés módszere

A mérési adatok kiértékelése során meghatároztam azokat a jellemzőket, amelyeket a klasszikus szárítási folyamatok esetén minden esetben alkalmazunk (nedvességtartalom, száradási sebesség), illetve olyan jellemzőket, amelyek főként energetikai szempontból összevethetővé teszik az egyes növények vagy növénycsoportok tulajdonságait.

A kiinduló mintatömege (m_{minta}) a *burgonyafélék* és a *gyökérzöldségek* esetében 80 g, míg a *leveles* anyagok esetén 25 g volt. A szárítási folyamat során rögzített tömegvesztési adatok (m_v) segítségével meghatároztam a mikrohullámú szárítás után megmaradó mintatömeg (m_{mikro}) nagyságát:

$$m_{\text{mikro}} = m_{\text{minta}} - m_v \quad (3.1)$$

A tömegadatokat segítségével kiszámítottam a mikrohullámú szárítás után megmaradó nedves bázison mért nedvességtartalom (w_{mikro}) értékét:

$$w_{\text{mikro}} = \frac{m_{\text{mikro}} - m_e}{m_{\text{mikro}}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

A nedves bázison mért nedvességtartalom értékek egyszerűen átszámíthatóak száraz bázisra (X_{mikro}):

$$X_{\text{mikro}} = \frac{w_{\text{mikro}}}{100 - w_{\text{mikro}}} \quad (3.3)$$

A különböző kezdeti nedvességtartalommal rendelkező növények száradási folyamatainak összehasonlítása csak úgy lehetséges, ha a száradási görbék azonos pontból indulnak. Erre a legegyszerűbb módszer, hogy a nedves bázison mért nedvességtartalom helyett, a nedvességviszonyt (Y) ábrázoljuk a kezelési idő függvényében. A nedvességviszony értéke a száraz bázison számított nedvességtartalom segítségével, a következő összefüggés alapján számítható:

$$Y_{\text{mikro}} = \frac{X_{\text{mikro}} - X_e}{X_1 - X_e} \quad (3.4)$$

Ez az összefüggés egyszerűsíthető a mikrohullámú szakasz nedvességviszonyának megadásakor, ha a szárítószekrényből kivett minta nedvességtartalmát tekintjük az egyensúlyi nedvességtartalomnak (X_e). Ekkor ugyanis a nedvességtartalom alapösszefüggéséből (3.5 egyenlet) adódóan az egyensúlyi nedvességtartalomhoz tartozó érték $X_e = 0$ lesz.

$$X = \frac{m_{\text{víz}}}{m_{\text{sz}}} \quad (3.5)$$

Ezzel a 3.4 egyenlet a következő formára egyszerűsíthető:

$$Y_{\text{mikro}} = \frac{X_{\text{mikro}}}{X_1} \quad (3.6)$$

A számított nedvességviszony átlagértékéhez meghatároztam az 5 mérésből származó szórás (s) értékét is. Ezt a mérési mintákra vonatkozó összefüggés segítségével számítottam ki (BARÁTH és tsai.).

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Y_{i_mikro} - \bar{Y}_{mikro})^2}{n - 1}} \quad (3.7)$$

A mintavételezési időközökben eltérés volt az egyes mérési sorozatokban, ezért, hogy ezek összevethetőek legyenek a további értékek, már egységesen 1 perc időközre számítottam ki. A száradási sebesség (S), vagyis az időegység alatt bekövetkező nedvességtartalom csökkenés meghatározása a következő összefüggés alapján számítható:

$$S_i = \frac{X_{i+1} - X_i}{\Delta\tau} \quad (3.8)$$

A teljesítményadatok meghatározására - a 3.2. pontban már említett csillapítás miatt - a mérés után szükség van a tárolt teljesítmény-adatok átszámítására, az iránycsatoló műszaki paramétereinek (L_{dB} , C_{dB} , D_{dB}) figyelembe vételével (LUDÁNYI, 2004).

Az iránycsatoló jellemzői közül elsőként az iránycsatoló csillapítását (L_{dB}) kell meghatározni:

$$L_{dB} = 10 \cdot \lg \frac{P_M}{P_d}, \quad (3.9)$$

ahol: P_M – a magnetron maximális teljesítménye
 P_d – a szárítmányban disszipált teljesítmény.

Az iránycsatoló csatolási tényezőjének (C_{dB}) értéke:

$$C_{dB} = 10 \cdot \lg \frac{P_M}{P_h}, \quad (3.10)$$

ahol P_h – a szárítótérbe lépő (haladó irányú) teljesítmény.

Az iránycsatoló irányhatásának (D_{dB}) nagysága:

$$D_{dB} = 10 \cdot \lg \frac{P_h}{P_v}, \quad (3.11)$$

ahol: P_v – a szárítmányról visszaverődő teljesítmény.

A haladó és reflektált teljesítmények ismeretében az anyagban elnyelődött (disszipált) teljesítmény értéke számítható:

$$P_d = P_h - P_v. \quad (3.12)$$

A kísérletek során a haladó irányú ($P_{h_mért}$) és a visszavert ($P_{v_mért}$) teljesítmények mérésére volt lehetőségem. Az NRVS teljesítménymérőkről az értékek mW-ban kerültek leolvasásra, amelyeket a fenti paraméterek segítségével számítottam át W-os értékekre:

$$P_h = 10^{\frac{C_{dB}}{10}} \cdot P_{h_mért}, \quad (3.13)$$

$$P_v = 10^{\frac{C_{dB}}{10}} \cdot P_{v_mért}, \quad (3.14)$$

ahol: $C_{dB} = 28 + 20 = 48$ dB, az iránycsatoló és a fix csillapítás összegzett csatolási tényezője.

Mivel a teljesítmény- illetve tömegadatok mintavételi ideje eltért egymástól, ezért a tömegmérés 1 perces időtartamára számítottam át a teljesítmény értékeket. Ehhez elsőként a teljesítménymérési időközökre ($\Delta\tau = 5$ s) jellemző disszipált teljesítmény értékét határoztam meg egyszerű számtani közép számításával:

$$P_{d_5s} = \frac{P_{d_{i+1}} + P_{d_i}}{2}. \quad (3.15)$$

A disszipált teljesítmény értékének ismeretében meghatározható a mintavételi időre ($\Delta\tau = 5$ s) számított hasznosult energia (q_{d_5s}) nagysága.

$$q_{d_5s} = P_{d_5s} \cdot 5 \text{ s.} \quad (3.16)$$

A tömegmérések 1 perces időtartama alatt közölt összes energia nagyságát az 5 másodperces adatok összegzéséből kaptam meg:

$$q_{d_60s} = \sum q_{d_5s}. \quad (3.17)$$

Ebből az 1 perces időközre egyszerűen visszszámítható a disszipált teljesítmény értéke:

$$P_{d_60s} = \frac{q_{d_60s}}{60s}. \quad (3.18)$$

A fajlagos teljesítmény és energiafelhasználás meghatározásához elsőként az 1 perc alatt bekövetkezett tömegvesztés nagyságát számítottam ki:

$$\Delta m = m_{i+1} - m_i. \quad (3.19)$$

Az időegység alatt közölt teljesítmény és energia, valamint tömegvesztési adatok alapján kiszámítottam az 1 perces időtartam során egységnyi tömegű víz elpárologtatásához alkalmazott fajlagos teljesítmény (P_f) és az ugyanezen idő alatt közölt energia nagyságát fajlagos energia (q_f) nagyságát:

$$P_f = \frac{P_{d_60s}}{\Delta m}. \quad (3.20)$$

$$q_f = \frac{q_{d_60s}}{\Delta m}. \quad (3.21)$$

Az egységnyi vízpárologtató teljesítmény és a száradási sebesség értékeinek ismeretében a fajlagos száradási sebesség kiszámítható:

$$S_f = \frac{S}{P_f}. \quad (3.22)$$

A fenti összefüggés mértékegysége SI egységekben, a sokkal egyszerűbb [kg víz/J] formában is megadható, ugyanakkor a fajlagos száradási sebesség értelmezését egyszerűbbé teszi a gyakorlatban is használatos, de összetett mértékegység.

Az egyes mérési sorozatok csökkenő száradási sebesség szakaszára vonatkozó energetikai viszonyainak összehasonlításához kiszámítottam a relatív energiaszükséglet értékeit. Ehhez először minden sorozat legkisebb elemét (q_{f_min}) vettem alapul. A legkisebb értékhez viszonyítva kiszámítható a többi relatív érték:

$$q_r = \frac{q_f}{q_{f_min}}. \quad (3.23)$$

Mivel az egyes növények kezdeti nedvességtartalma eltérő volt, ezért a növekvő relatív energiaszükséglet szakaszán a növénycsoportok elemzéséhez egységes kezdőpont kialakítására van szükség. Ehhez kiszámítottam a relatív nedvességtartalom értékét, amelyhez a növekvő szakasz kezdőpontjának nedvességtartalmát (X_{kr}) vettem alapul, majd ehhez viszonyítottam a további nedvességtartalom értékeket:

$$X_r = \frac{X}{X_{kr}} \quad [-]. \quad (3.24)$$

A számításokat követően a mért és számított adatokat diagramok formájában ábrázoltam, amelyeket a következő fejezetben ismertetek részletesen.

4. EREDMÉNYEK

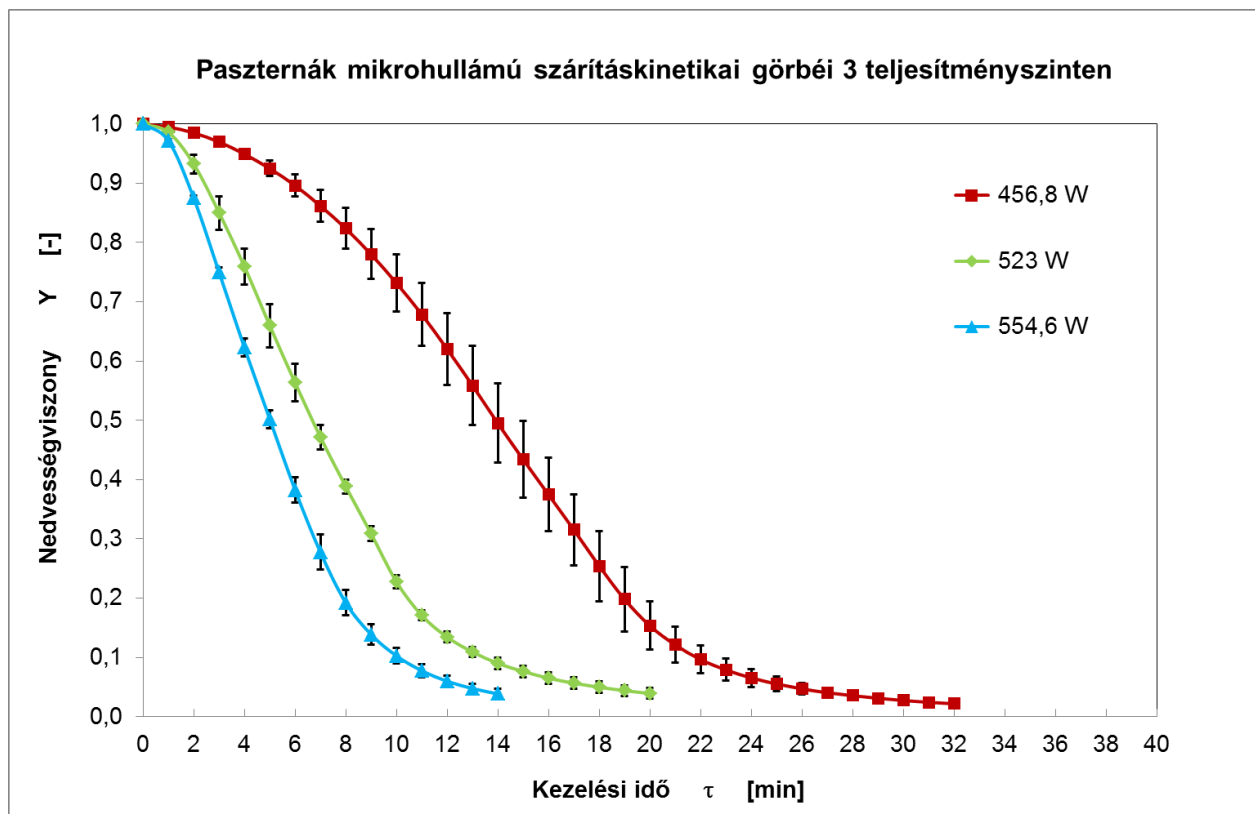
Ebben a fejezetben összefoglalom az elvégzett mérések eredményeit és az ezek alapján, a mikrohullámú energiaközlés és a növények morfológiai felépítésére kapcsolatát bemutató megállapításokat. A fejezetben külön foglalom össze a kutatás céljaihoz illeszkedően az elért új tudományos eredményeket.

4.1. A mikrohullámú szárítási kísérletek eredményei

A mikrohullámú szárítások során kapott adatsorokat növényenként azonos módon értékeltem ki, amit a paszternák eredményein keresztül mutatok be.

4.1.1. A paszternák mérések eredményei

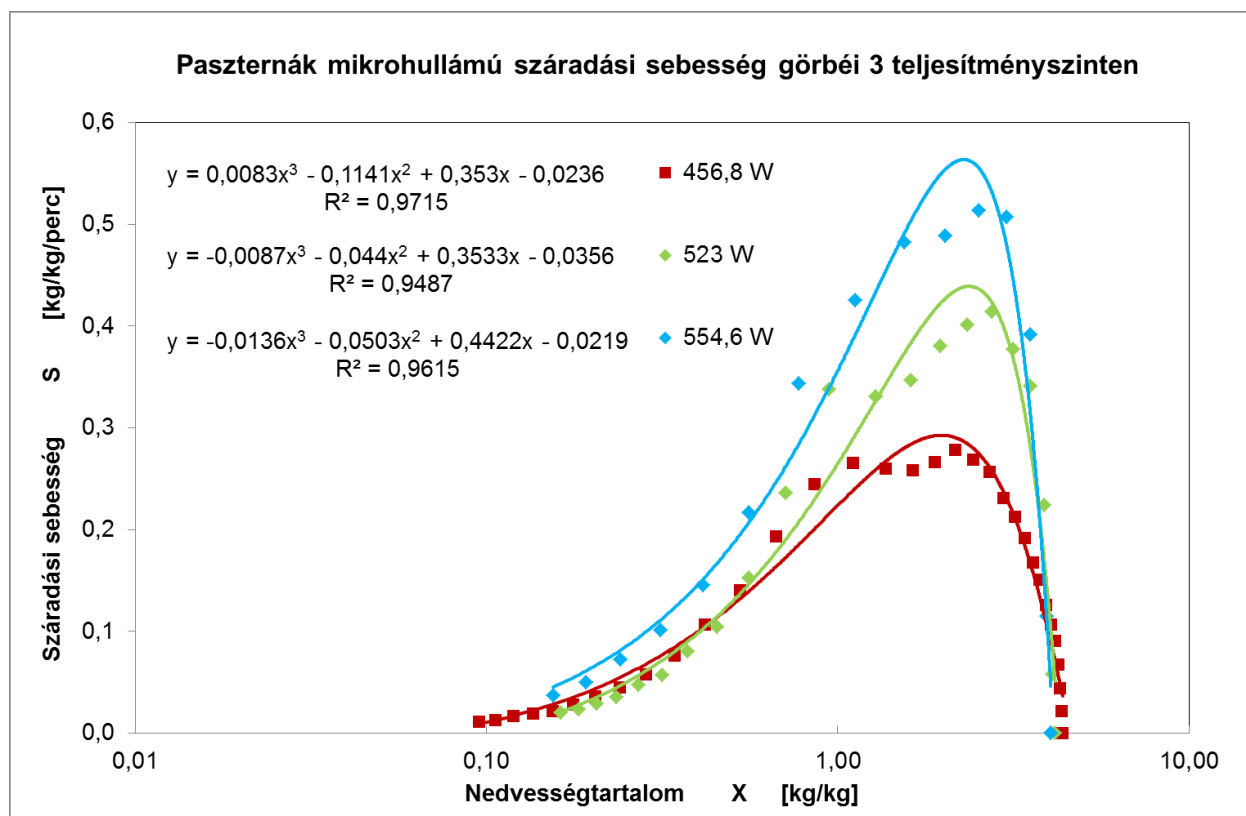
Elsőként megrajzoltam az 5 mérés átlagából kapott szárításkinetikai görbét a különböző teljesítményszinteken. A paszternák mérések részletes eredményeit az M3.1. mellékletben mutattam be. Mivel az egyes növényfajták eltérő kiindulási nedvességtartalommal rendelkeztek, így a későbbi összehasonlítást egyszerűbbé téve, a nedves bázison számított nedvességtartalom (w) helyett a nedvességviszony (Y) értékeket ábrázoltam a különböző teljesítményszinteken a kezelési idő függvényében (4.1. ábra). A görbéken ábrázoltam az 5 mérési sorozatból származó szórás értékeket is. A szórás értékeit elemezve kijelenthető, hogy az egyes mérési sorozatok közötti eltérés a szárítási folyamatok középső szakaszán a legnagyobb, de az eltérés nagysága a teljesítményszint növelésével egyre kisebb lesz. A kapott görbék a klasszikus konvektív száradási folyamatok során jellemző száradási görbékhez hasonlóan alakulnak. Az eltérés a szárítási folyamat idejében mutatkozik, amely igazodva az energiaközlés formájához sokkal rövidebb (így a görbe sokkal meredekebb), mint konvektív esetben. Ismerve a mikrohullámú energia hatásmechanizmusát az eltérő jelenségek magyarázhatók. Miután az energiaabszorpció



4.1. ábra Paszternák szárításkinetikai görbéi a vizsgált teljesítményszinteken

arányos a minták nedvességtartalmával, továbbá a termikus hatás is ott jelentkezik, ahol a kezelt anyag vizet tartalmaz, a kezdeti felmelegítési szakasz, valamint a végső aszimptotikus csökkenő száradási sebességű szakasz lerövidül. A szárításkinetikai görbék alapján az is nyilvánvaló, hogy az alkalmazott teljesítményszint növelésével, a kezelési idő csökken.

A nedves bázison számított nedvességtartalomról (w) a (3.3) összefüggés segítségével kiszámíthatjuk a száraz bázison mért nedvességtartalom (X) értékeket. A száraz bázison mért nedvességtartalom függvényében egyszerűen ábrázolható a száradási sebesség (S), amely az időegység alatt bekövetkező nedvességtartalom változását mutatja be. A 4.2. ábrán a 3 teljesítményszinten kapott száradási sebesség görbéket láthatók. Ezen az ábrán egyértelműen látszik, hogy a teljesítmény növelésével a száradási sebesség értékek is egyre nagyobbak lesznek. A vizsgált jellemzők közötti függvénykapcsolat meghatározásakor célt volt, hogy minél egyszerűbb összefüggést találjak, amely még megfelelő pontossággal írja le a folyamatot. Minden növény esetén a teljes szárítási folyamat során kapott pontokra, a legkisebb négyzetek elvét alkalmazva kerestem leíró összefüggést. Ennek eredményeképpen már egy harmadfokú polinommal is kellő pontossággal (a minimális determinációs együttható értéke $R^2 = 0,9$ volt) tudtam görbét illeszteni.

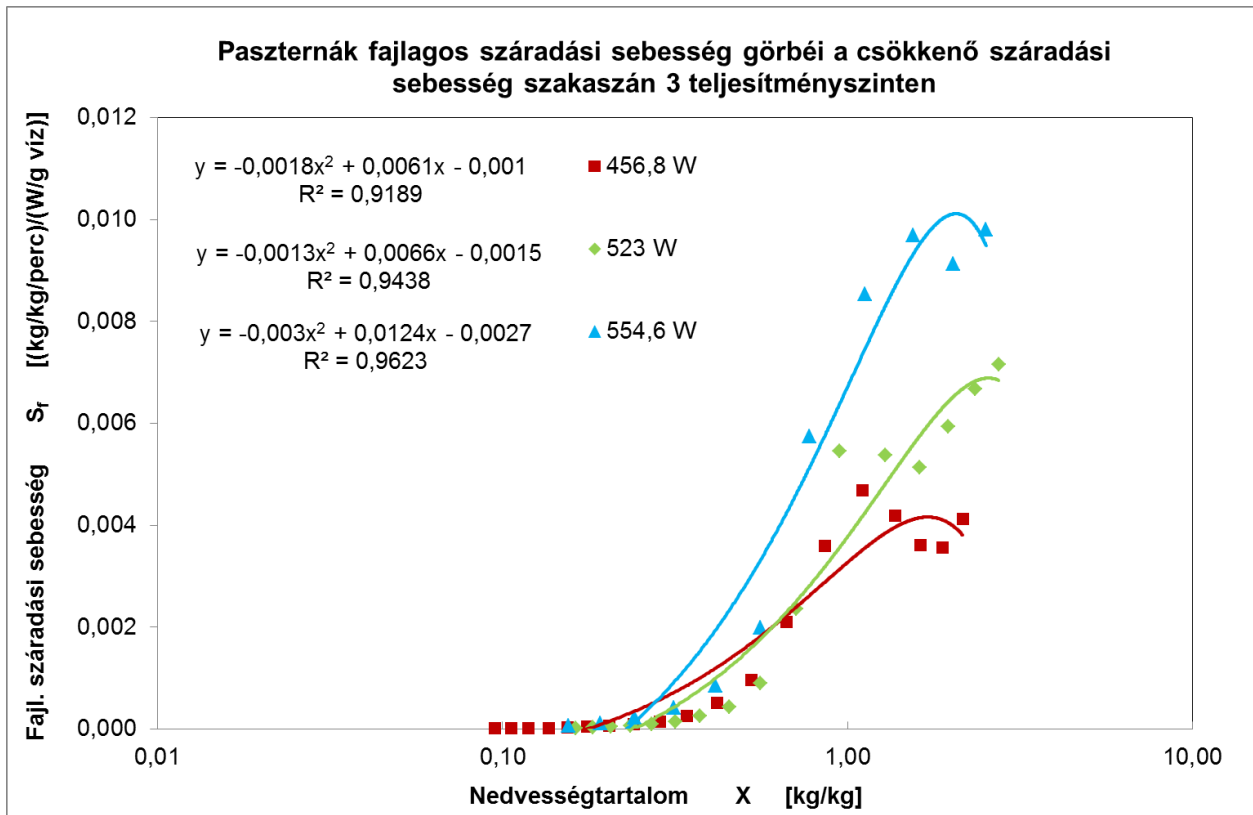


4.2. ábra Paszternák száradási sebesség görbéi a vizsgált teljesítményszinten

Mivel a klasszikus mezőgazdasági anyagok konvektív szárítási folyamatára jellemző állandó száradási sebességű szakasz az alkalmazott kísérleti beállítások mellett nem volt kimutatható, így a száradási folyamat szempontjából lényeges jellemzőit a csökkenő száradási sebesség szakaszán volt célszerű vizsgálnom. Ehhez a kiszámított száradási sebesség értékek közül mérésenként meghatároztam a maximális értéket. A továbbiakban a számított jellemzőket már csak a maximális érték utáni a szakaszra határoztam meg.

A következő lépésben a disszipált teljesítményadatok segítségével kiszámítottam a fajlagos száradási sebesség értékeket. A fajlagos száradási sebesség megmutatja az egységnyi tömegű vízelvonásra jutó energia felhasználáshoz tartozó száradási sebesség értékeket. Ezáltal a különböző mérési sorozatok száradási sebesség értékei egyszerűen összehasonlíthatóak.

A 4.3. ábrán a paszternák mérések csökkenő száradási sebesség szakaszára vonatkozó fajlagos száradási sebesség értékei láthatóak a száraz bázison számított nedvességtartalom függvényében. A fajlagos száradási sebesség értékek is azt mutatják, hogy az egyre nagyobb kezelési teljesítményszintek alkalmazása növeli a száradási sebesség értékét. Az ábrán feltüntettem az egyes teljesítményszintekhez tartozó leíró egyenleteket - a hozzájuk tartozó

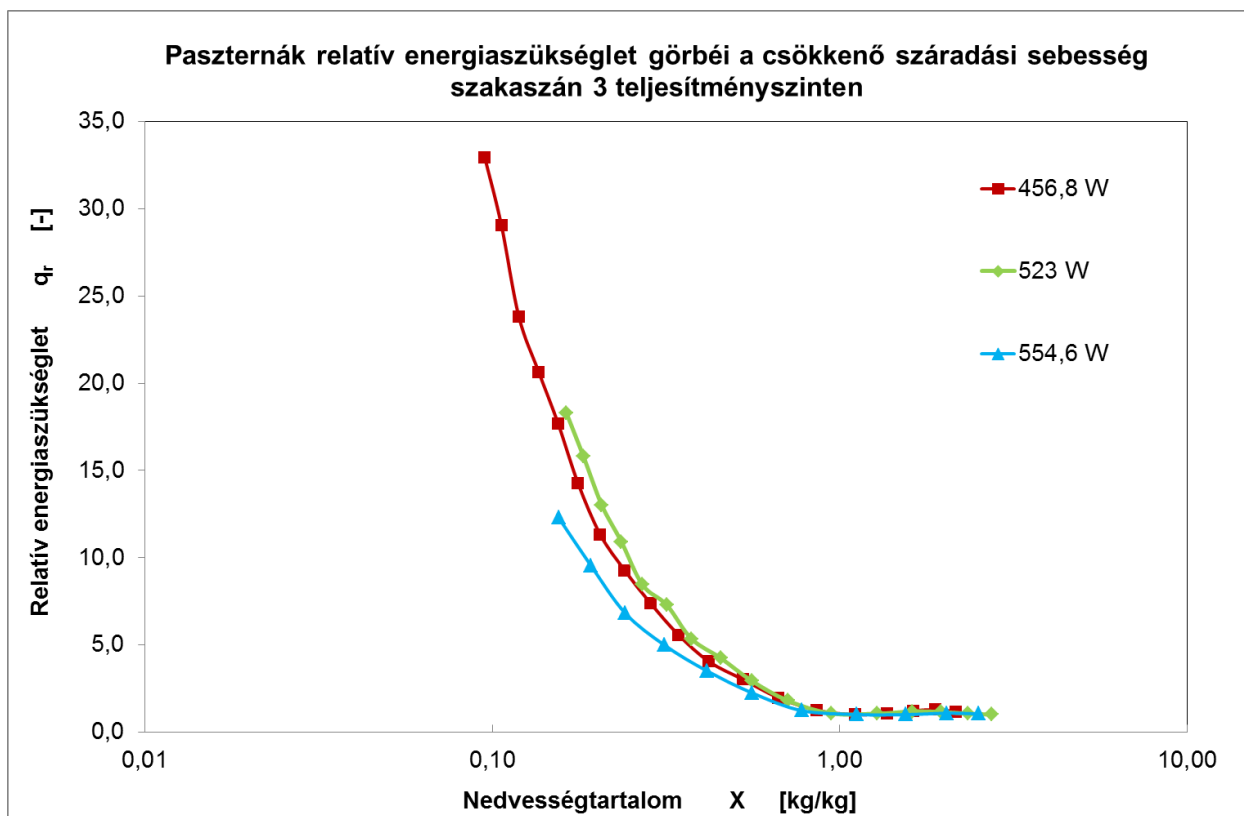


4.3. ábra Paszternák fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán

determinációs együtthatóval együtt. Amint az látható, az itt kapott pontok összessége már egy másodfokú polinommal is megfelelő pontosságú illesztéssel megadható. (A determinációs együttható R² értéke minden vizsgálat esetében nagyobb volt, mint 0,84.) A leíró egyenlet általános alakja:

$$S_f = a \cdot X^2 + b \cdot X + c. \quad (4.1)$$

Az egyes növények adatainak feldolgozását a szárítási folyamat energetikai mutatóinak meghatározásával fejeztem be. Ehhez elsőként kiszámítottam a teljes folyamat energiafelhasználását a mintavételezési szakaszokra felosztva. Ezek közül a csökkenő száradási sebesség szakaszára vonatkozó értékek közül kiválasztottam a legkisebbet, mint a viszonyítás alapját. Ehhez képest adtam meg a folyamat többi értékét, mint relatív energiaszükségletet (3.23. egyenlet), majd ábrázoltam a száraz bázison számított nedvességtartalom függvényében. A 4.4. ábrán a paszternák relatív energiaszükségletét ábrázoltam. A relatív energiaszükséglet görbék minden növény típus és minden teljesítmény szint esetén két egymástól jól elkülöníthető szakaszra osztható fel. A csökkenő száradási sebesség szakaszának első felében egy állandónak tekinthető energiaszükséglet jelentkezik, majd ezt követően a görbék meredeken emelkedni kezdenek. Az állandó szakasz hossza az egyes növénytípusoktól és az alkalmazott teljesítményszintektől függően eltérően alakul.

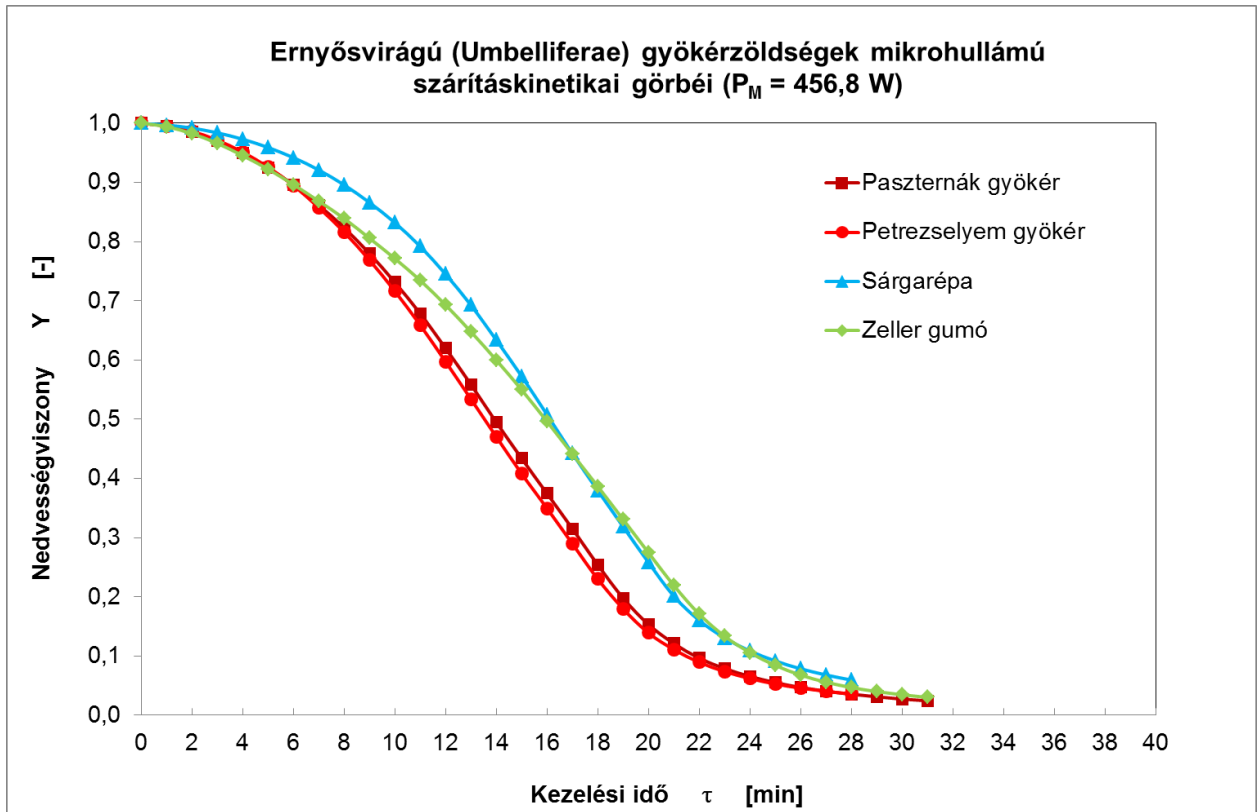


4.4. ábra Paszternák relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán

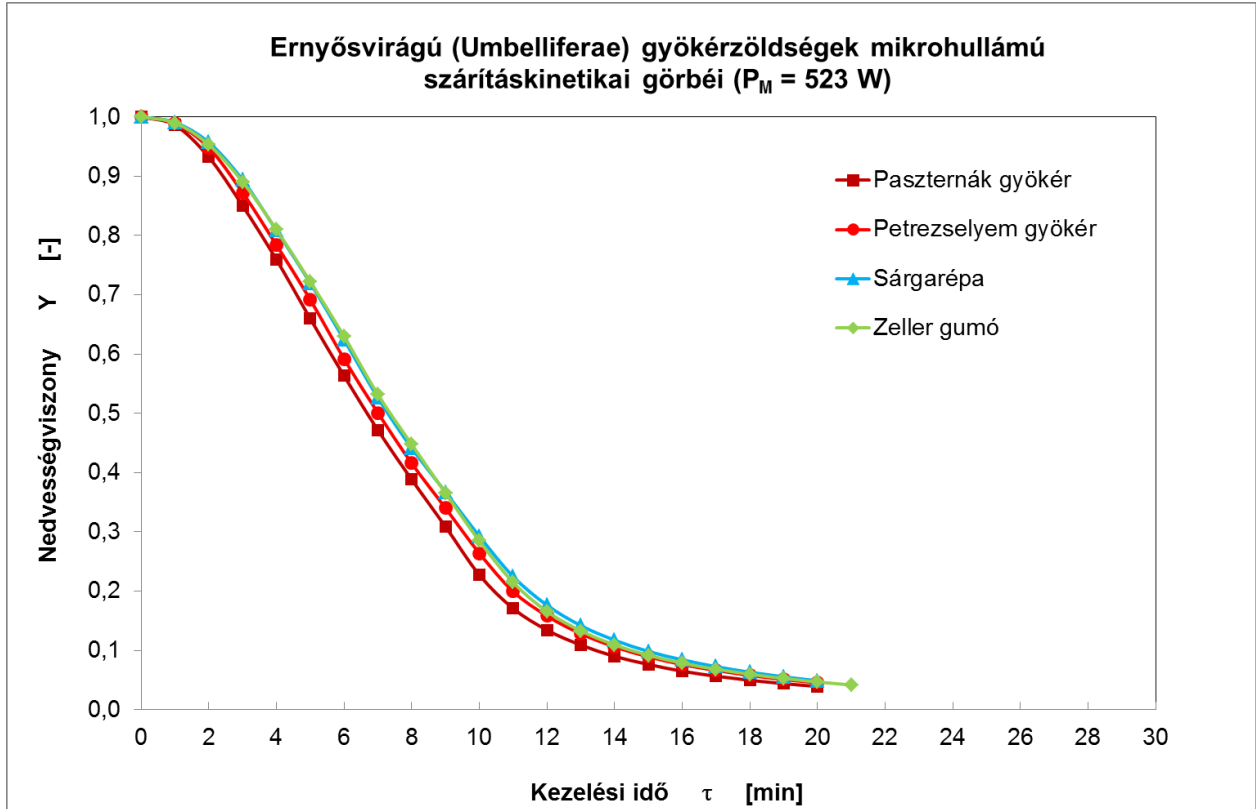
Az előzőekben bemutatott diagramokat minden növény esetében elkészítettem, amelyeket a Mellékletben helyeztem el. A továbbiakban ezeket az eredményeket az egyes növénycsoportok viselkedésének vizsgálatára használom fel.

4.2. Az ernyősvirágú gyökérzöltségek vizsgálata

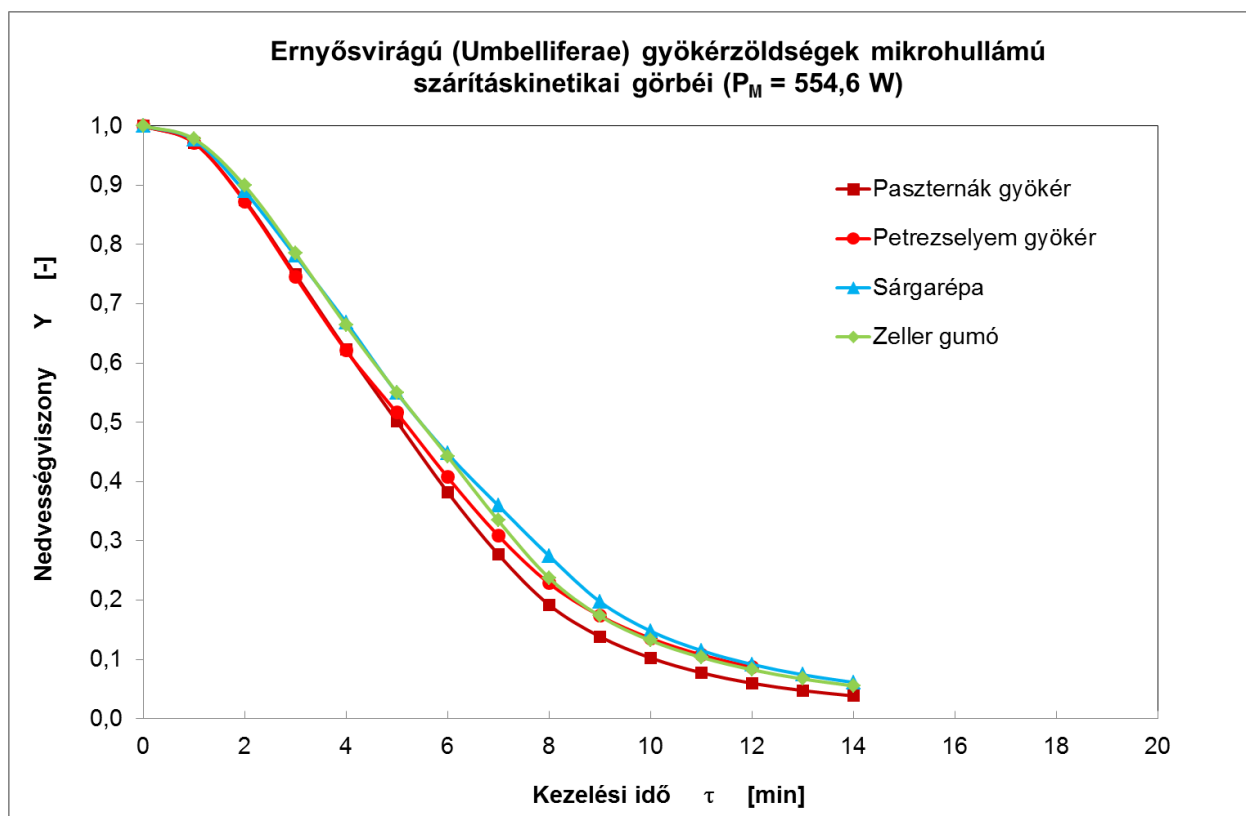
Az egyes növények adatainak feldolgozását követően (melyek eredményeit az M3.2.-M3.4. mellékletekben mutatok be) az egyes növénycsoportok közös jellemzőit vizsgáltam. Elsőként a száradási görbéket vettem össze (4.5. - 4.7. ábra). Az ábrákon megfigyelhetjük, hogy a 4 féle növény száradása a folyamata szinte azonosan megy végbe az idő függvényében. Kismértékű különbséget az egyes növények közötti minimális morfológiai felépítésben mutatkozó eltérés okozhat. Ez a különbség azonban a teljesítményszint növelésével sem növekszik jelentős mértékben, ami az egyes növények felépítésében mutatkozó hasonlóságra vezethető vissza. Ahogyan az várható volt, az egyre növekvő mikrohullámú teljesítményekhez, egyre rövidülő kezelési idők tartoztak. A 456,8 W-os szinten tapasztalt 30 perc körüli értékek az 523 W-os szinten 20 percre, míg az 554,6 W-os szinten 14 percre csökkent.



4.5. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek száradási görbéi (456,8 W)

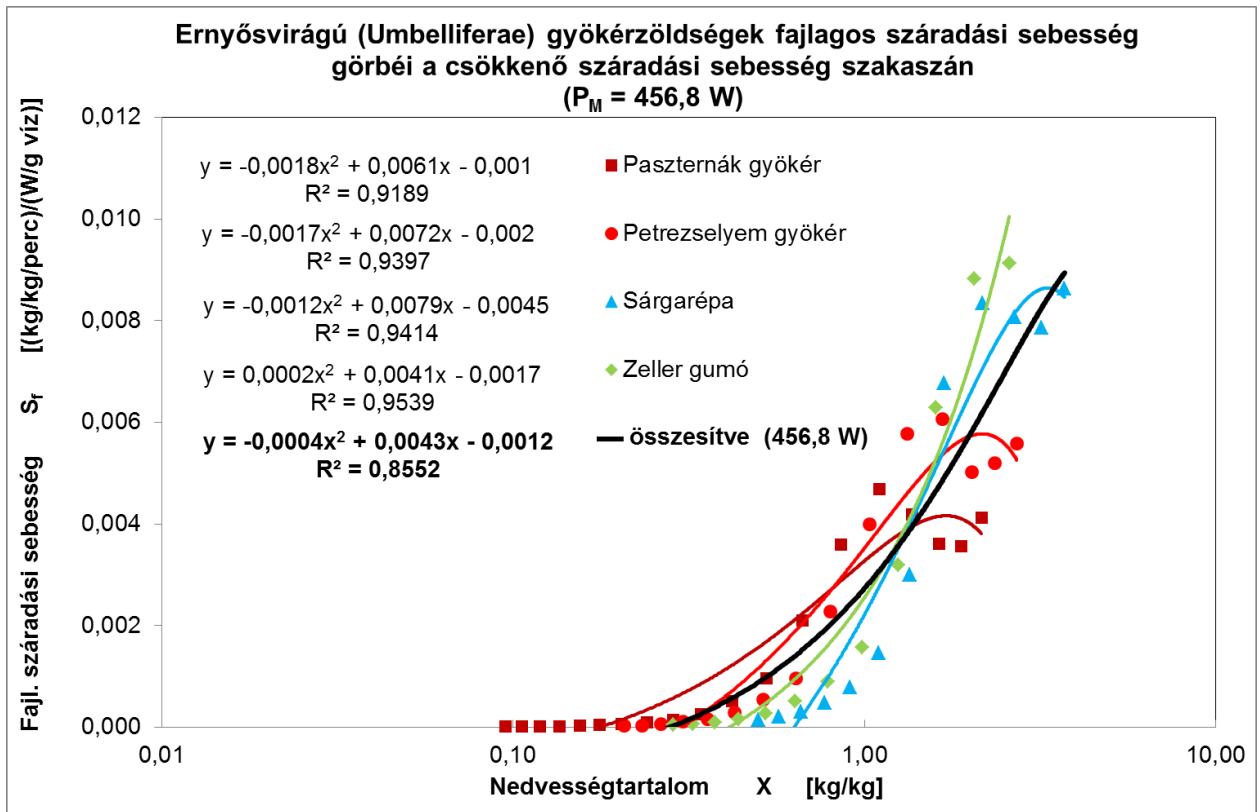


4.6. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek száradási görbéi (523 W)

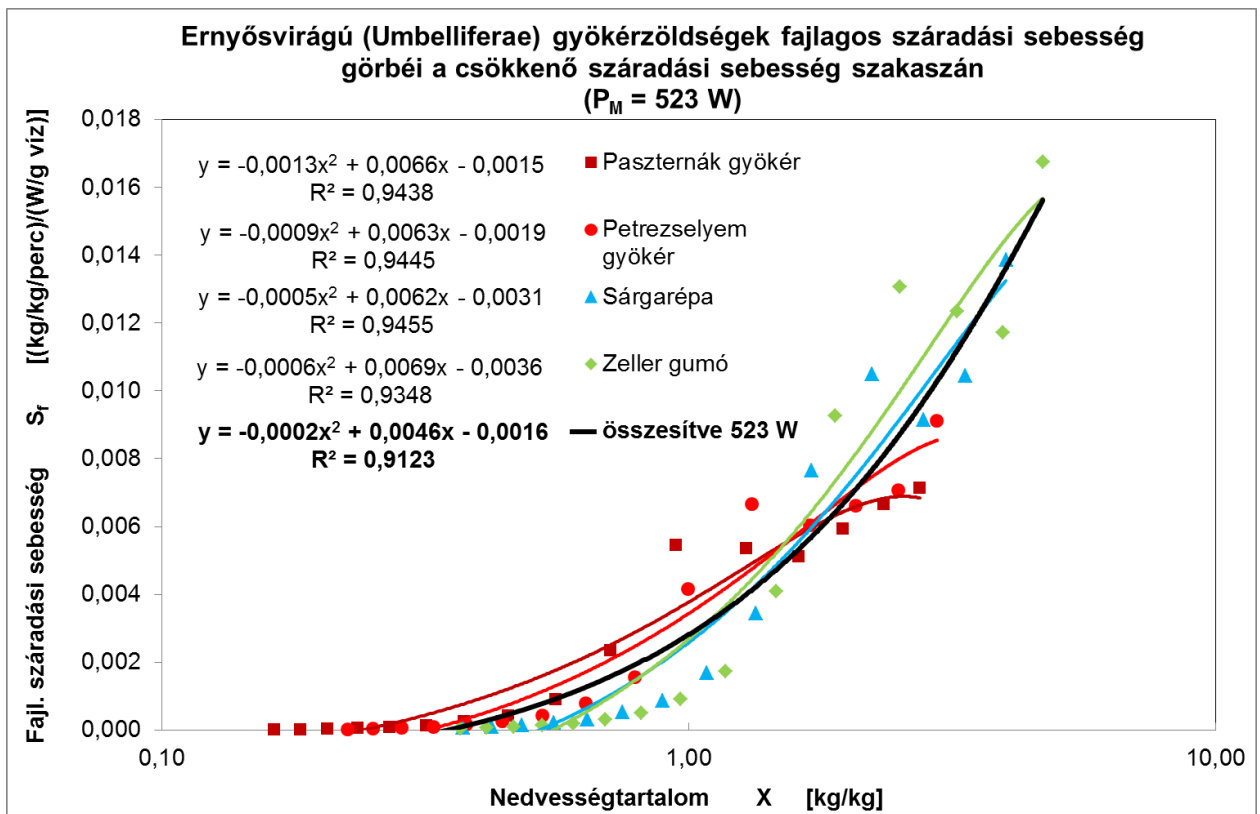


4.7. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek száradási görbéi (554,6 W)

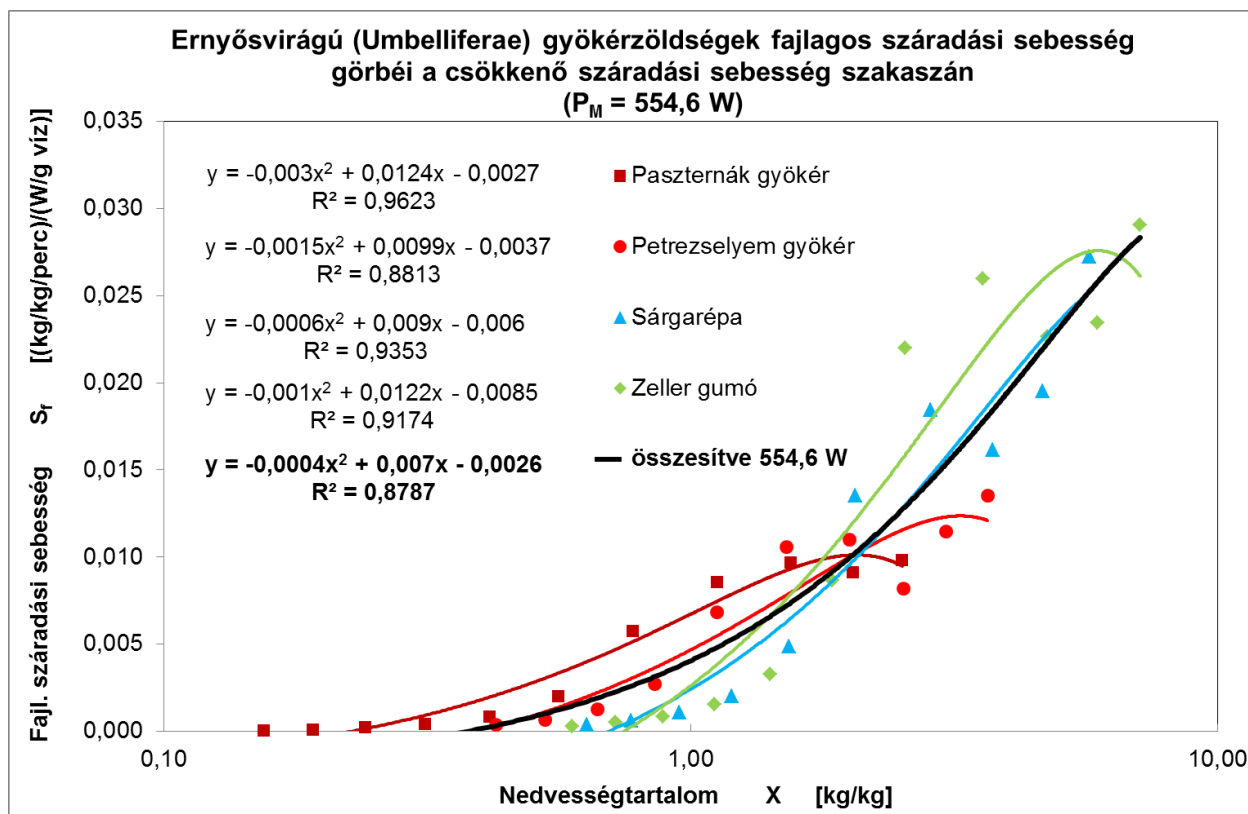
Az előző fejezetben leírtaknak megfelelően a gyökérzöldségek csoportjára is megszerkesztettem a teljes folyamat száradási sebesség görbéit, majd a fajlagos száradási sebesség értékeket ábrázoltam a száraz bázison számított nedvességtartalom függvényében. Amint az a 4.8 - 4.10. ábrákon jól látható az egyes növények fajlagos száradási sebesség görbéi, a csökkenő száradási sebesség szakaszán azonos módon alakulnak. A görbéket, ebben az esetben is másodfokú polinommal közelítettem, amelynek együtthatóit és az illesztés pontosságát a különböző növények esetén, az ábrán feltüntettem. A teljes csoport azonos viselkedését jól mutatja a 4 növény összes mérési pontjára illesztett görbe (*összesítve* nevű görbe), amely ugyancsak másodfokú egyenlettel adható meg és mindhárom teljesítmény szinten a determinációs együttható értéke meghaladja a 0,85-os értéket, ami pontos illeszkedésnek felel meg figyelembe véve a szárított anyag tulajdonságait. Ez alapján egyértelműen megállapítható, hogy a 4 növény tulajdonságai külön-külön is jól jellemezhetők a teljes csoportra jellemző összefüggés segítségével. Az egyes teljesítményszinthez tartozó csoportgörbéket egy diagramban ábrázolva (4.11. ábra) nyilvánvalóvá válik az arányos kapcsolat, azaz a teljesítmény növelésével a száradási sebesség értéke is növekszik. Az 554,6 W-os teljesítmény szinten számított fajlagos száradási sebesség értéke közel 3-szorosa a 456,8 W-os szinthez képest.



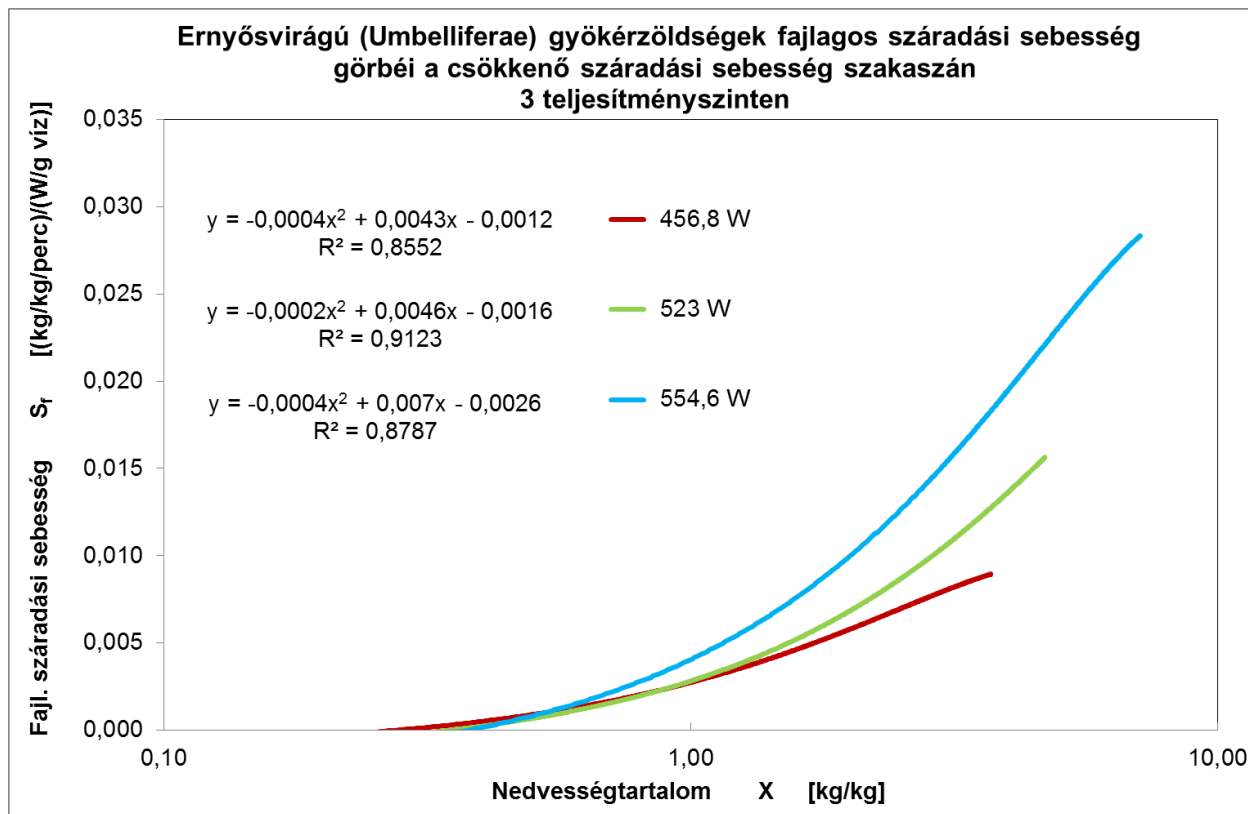
4.8. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (456,8 W)



4.9. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (523 W)

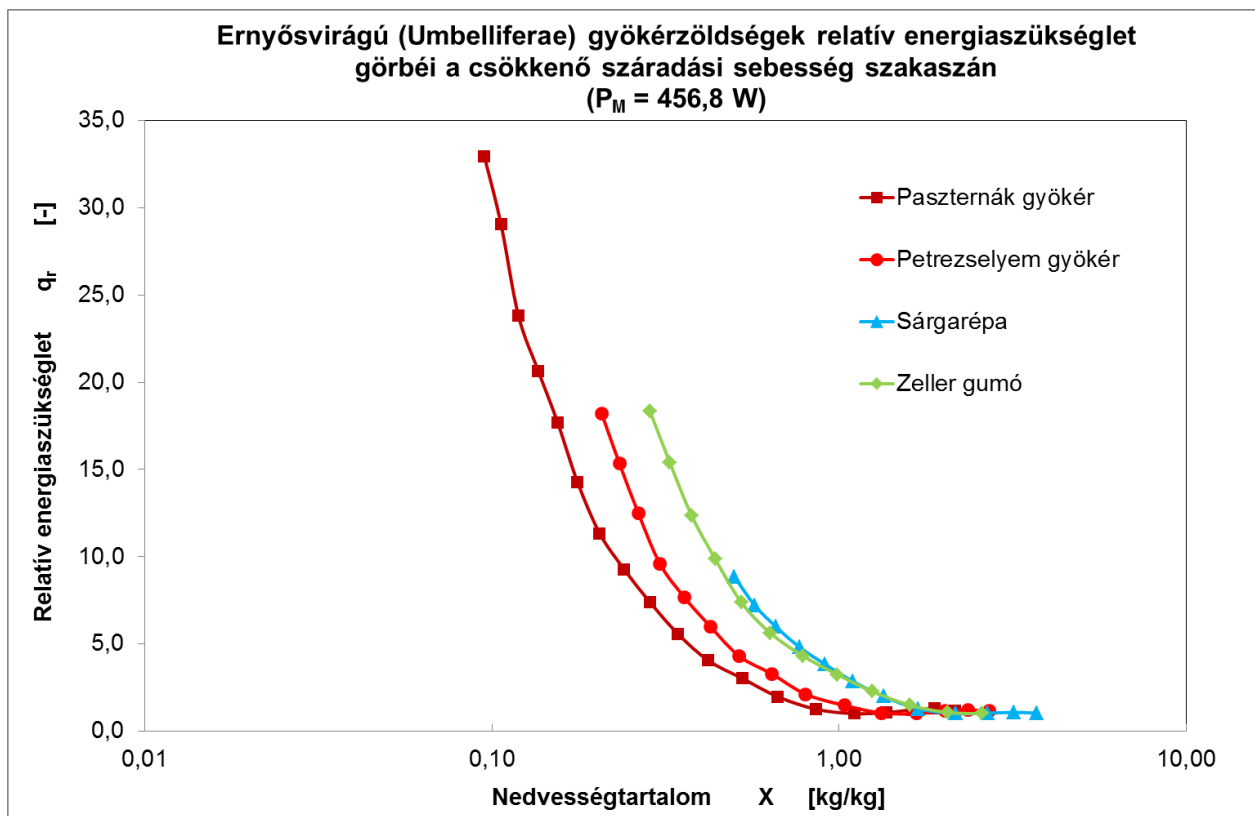


4.10. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán ($554,6 \text{ W}$)

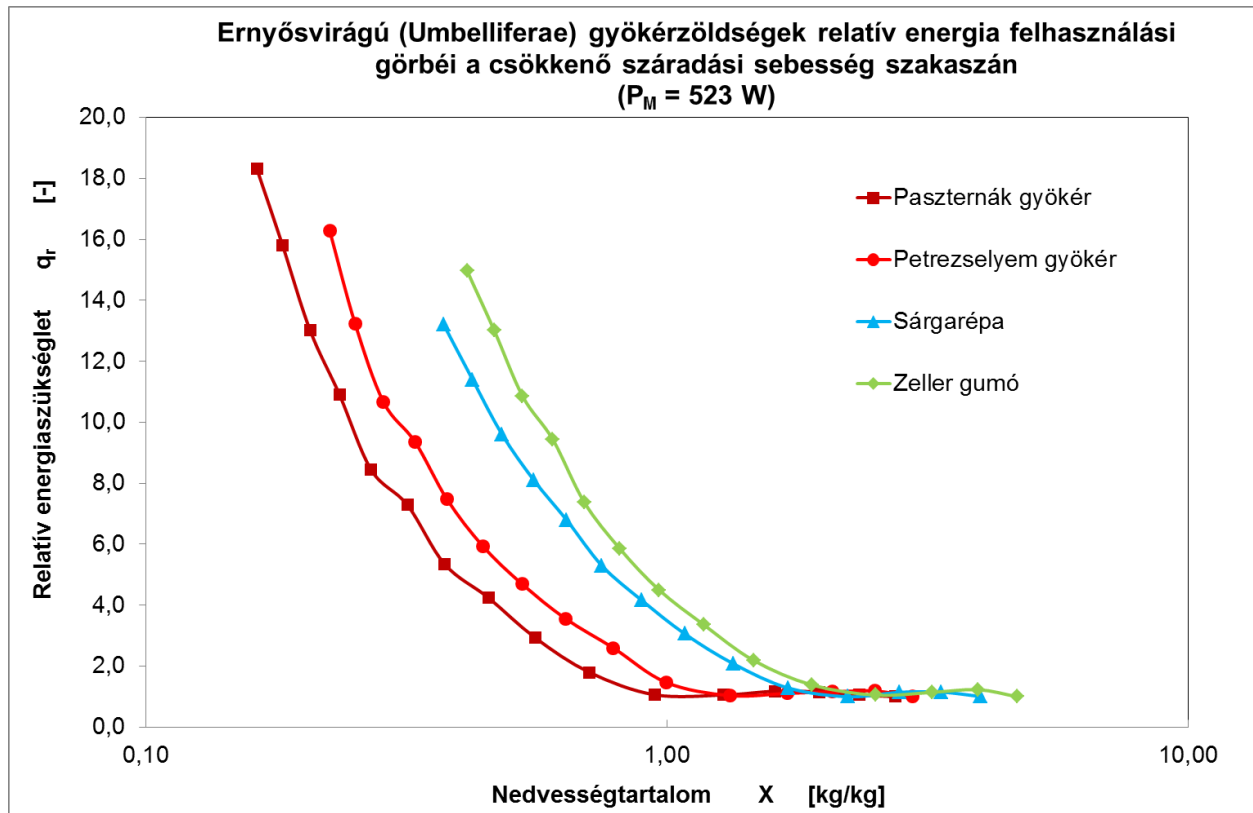


4.11. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán 3 teljesítményszinten

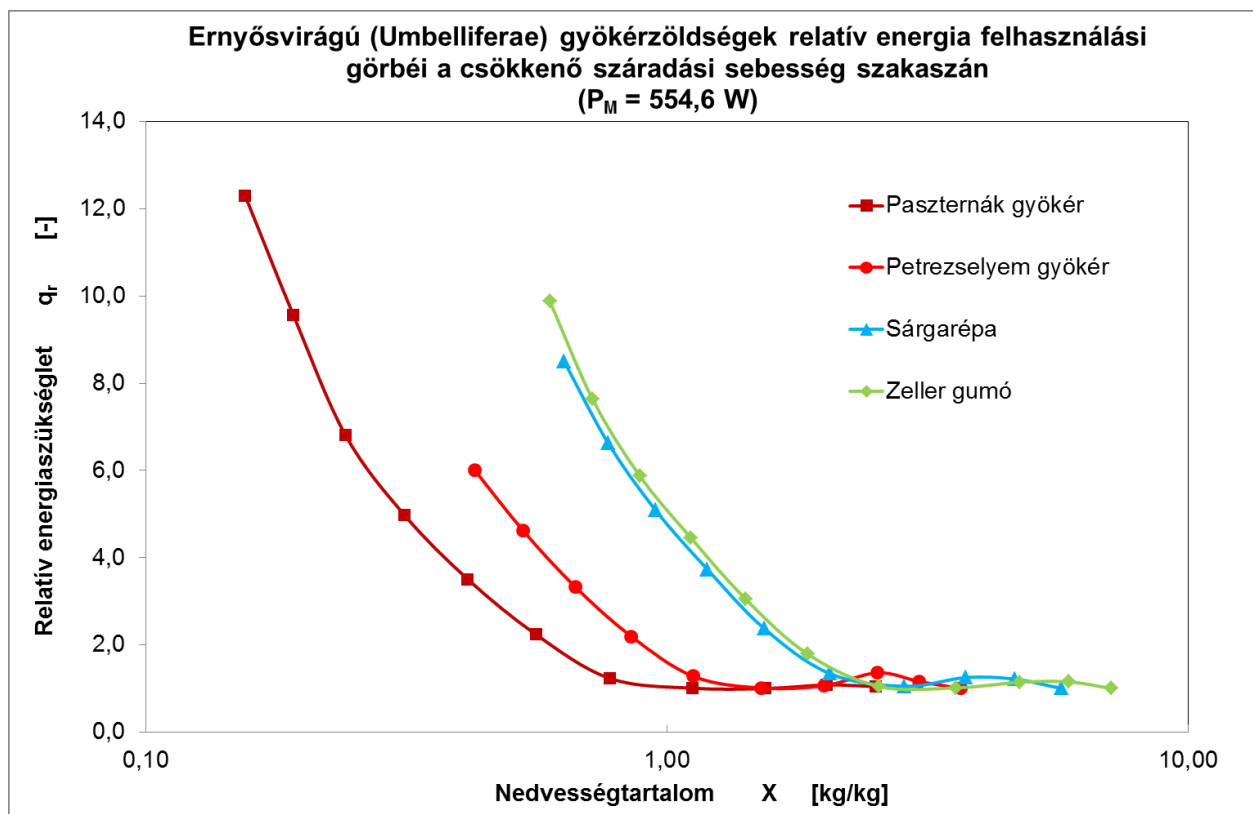
Hasonlóan az egyes növényeknél alkalmazott módszerhez, utolsó lépésként a relatív energiaszükséglet vizsgálata következett. Ezeket a görbék is először külön-külön, az egyes teljesítményszinteknek megfelelően, szerkesztettem meg (4.12. – 4.14. ábra). Minden növény esetében megfigyelhető a relatív energiaszükséglet görbéjének 2 szakaszra tagolódása. Hasonlóan a paszternáknál tapasztaltakhoz, itt is nagyobb nedvességtartalom tartományában az energiaszükséglet állandónak tekinthető, majd egy kritikus pontot követően az energiaszükséglet meredeken emelkedni kezd. Mivel az egyes növények kezdeti nedvességtartalma eltérő volt, ezért az egyes görbék között itt is kismértékű eltérések adódnak. A nagyobb kezdeti nedvességtartalmú növények esetén a növekedési szakasz kialakulása eltolódik a nagyobb nedvességtartalom irányába. A két szakaszt elválasztó kritikus pont helyzetének meghatározása kulcsfontosságú, mert csak így lehet teljes mértékben leírni a növekvő energiaszükséglet szakaszát. Ahogyan az a görbéken is látszik, az egyértelmű növekedési szakasz kialakulása nagymértékben függ az alkalmazott teljesítményszinttől. A 456,8 W-os szinten, az alkalmazott kis teljesítményszintnek köszönhetően, az átmenet fokozatos, megnehezítve a kritikus pont helyének egzakt meghatározását. Ezzel szemben az 554,6 W-os szinten ez a változás élesen jelentkezik, egyértelműen kijelölve a kritikus pont helyét.



4.12. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérszöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (456,8 W)



4.13. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (523 W)

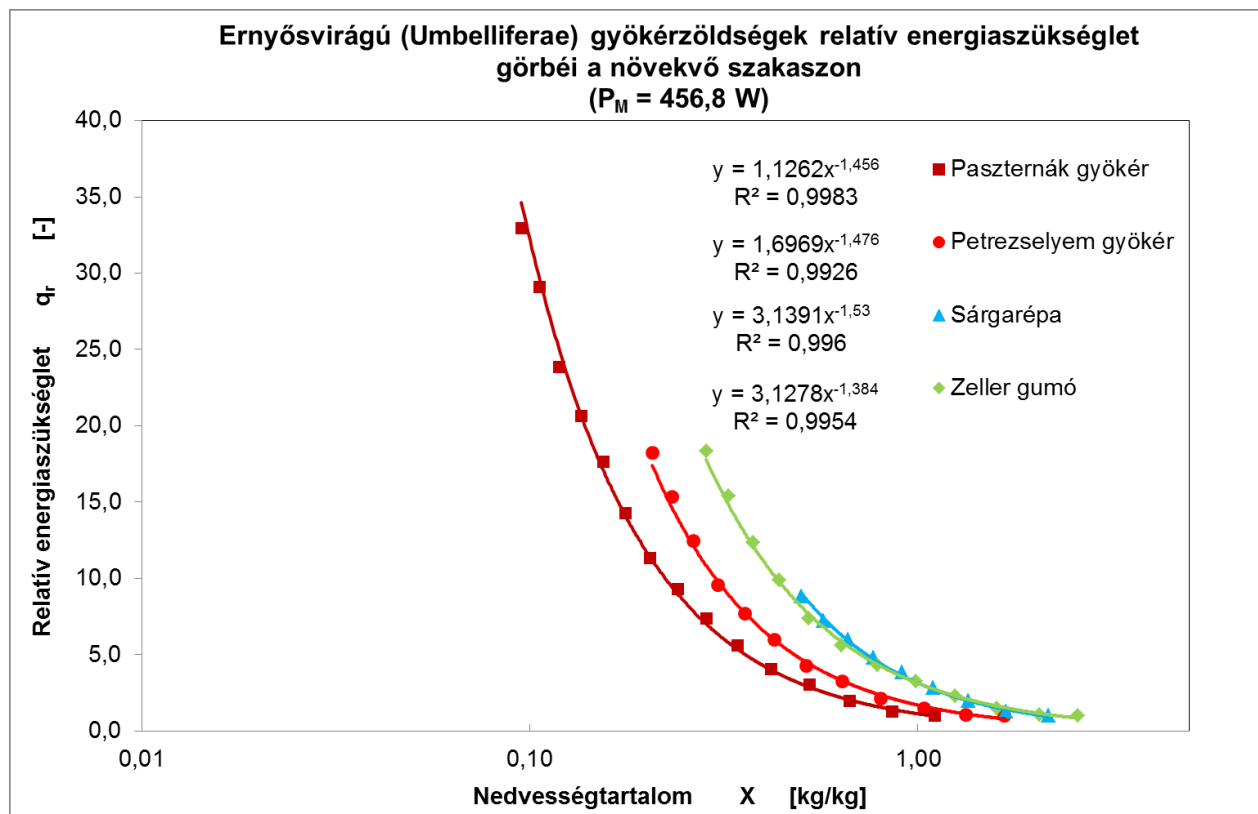


4.14. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (554,6 W)

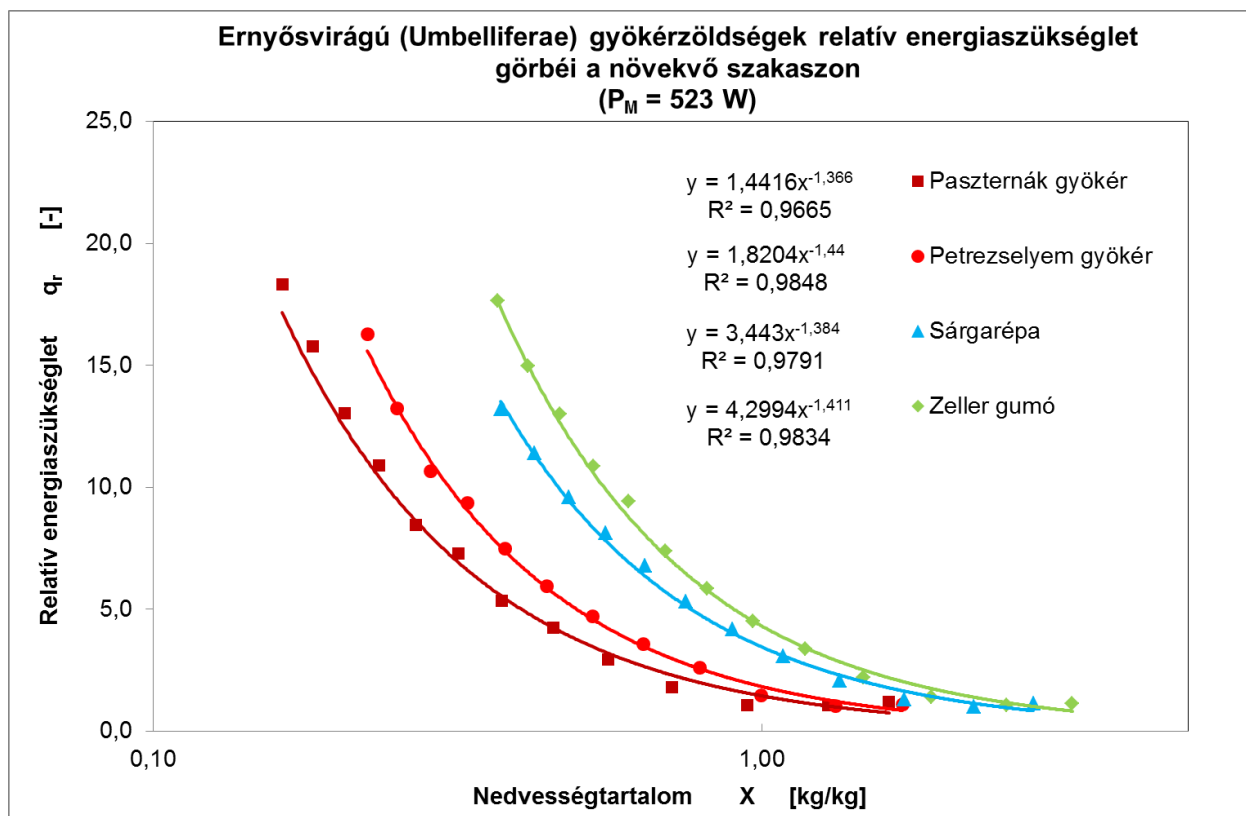
A kritikus pont helyének meghatározását követően, csak a növekedési szakaszra is felrajzoltam a diagramokat és függvénykapcsolatot kerestem a nedvességtartalom és a relatív energiaszükséglet között (4.15. - 4.17. ábra). A növekedő szakasz változásait legpontosabban egy egyszerű hatványfüggvénnyel tudtam közelíteni, amelynek általános alakja:

$$q_r = a \cdot X^b. \quad (4.2)$$

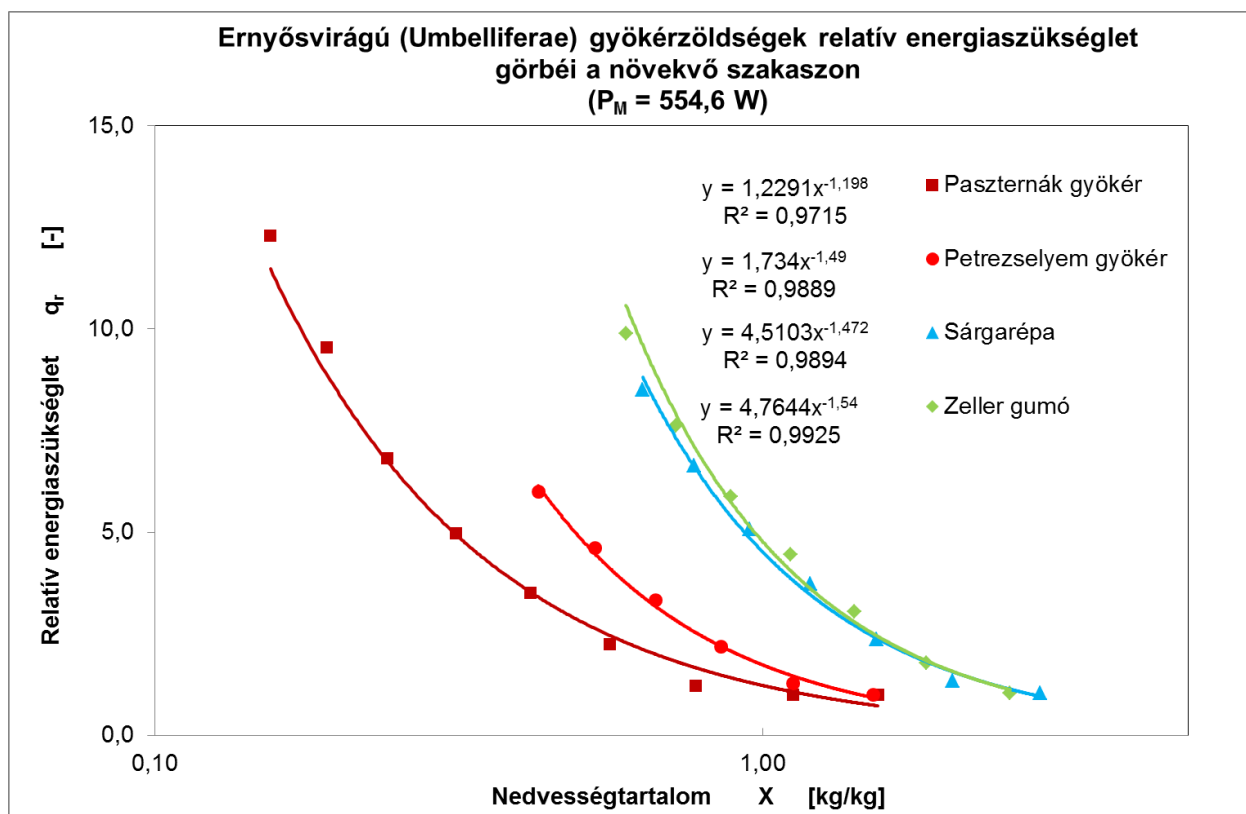
Az ábrákon az egyes növényekre vonatkozó egyenleteket is feltüntettem. A diagramokon az alkalmazott teljesítményszinttől függetlenül megfigyelhető, hogy az alacsonyabb kezdeti nedvességtartalommal rendelkező paszternák esetében a növekvő relatív energiaszükséglet szakaszának kialakulása az alacsonyabb nedvességtartalom értékekre esik. Ezzel szemben a magasabb kezdeti nedvességtartalommal rendelkező sárgarépa és zeller gumó esetében ez a magasabb nedvességtartalom irányába tolódik el, ami egyértelműen mutatja a kritikus pont helyzetének nedvességtartalomtól való függését. A teljesítményszint növelésével a kezdőpontok nedvességtartalma közötti különbség egyre nő, aminek oka az egységnyi anyagmennyiségre jutó energia nagyságának emelkedése.



4.15. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon (456,8 W)



4.16. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon (523 W)



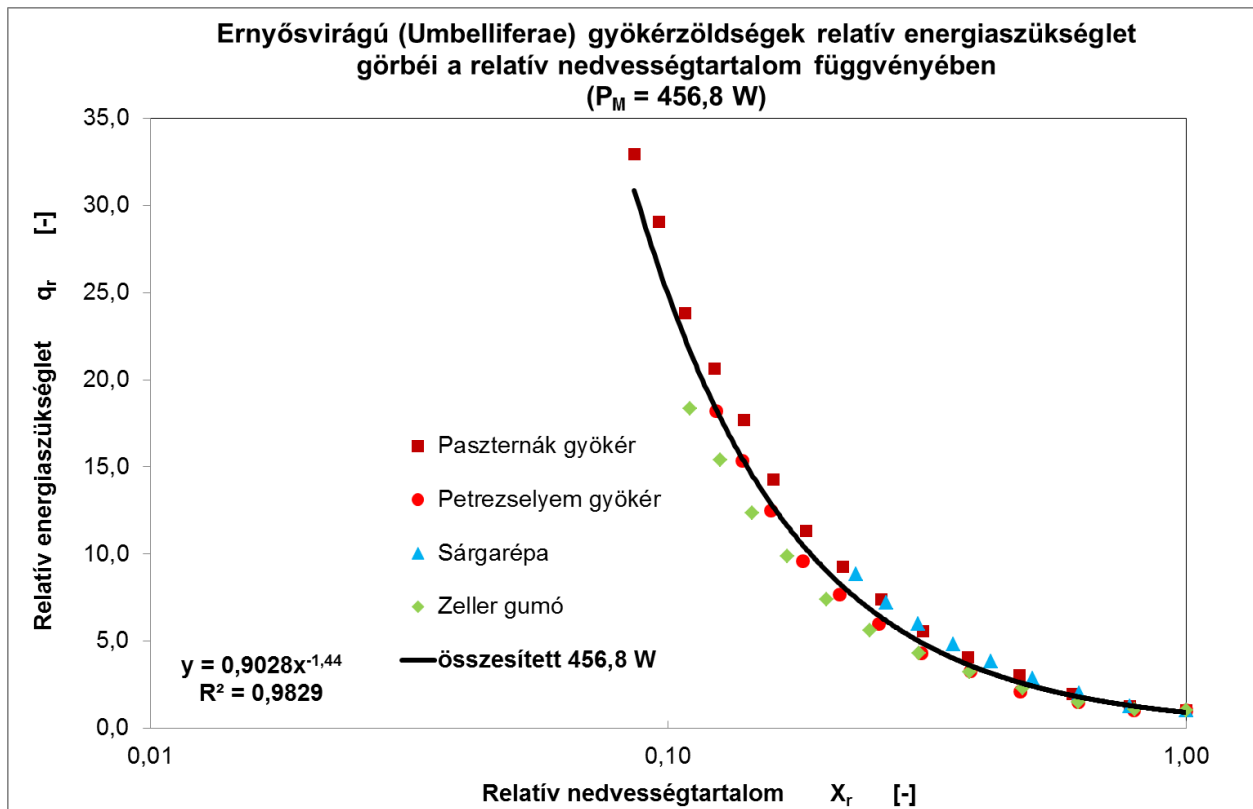
4.17. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon (554,6 W)

Mivel a kritikus pontok növényenként eltérő nedvességtartalmakhoz köthetőek, ezért a könnyebb összehasonlításuk érdekében a növekedési szakaszra felrajzolt görbéket egy közös kezdőpontba toltam el. Ehhez kiszámítottam a relatív száraz bázison mért nedvességtartalom értékét (3.24 egyenlet), amelynek meghatározásához a kritikus pont nedvességtartalmát vettem alapul és ehhez viszonyítottam a többi értéket. Az egyes teljesítményszintekhez tartozó relatív energiaszükséglet görbéket a növekedési szakaszon már a relatív nedvességtartalom függvényében ábrázoltam. Ezt a függvénykapcsolatot is minden teljesítményszinten meghatároztam, majd felrajzoltam a 4 növény összes mérési pontjára illesztett görbét, amely a 4.2 hatványfüggvényt alapul véve, a következő formában írható le.

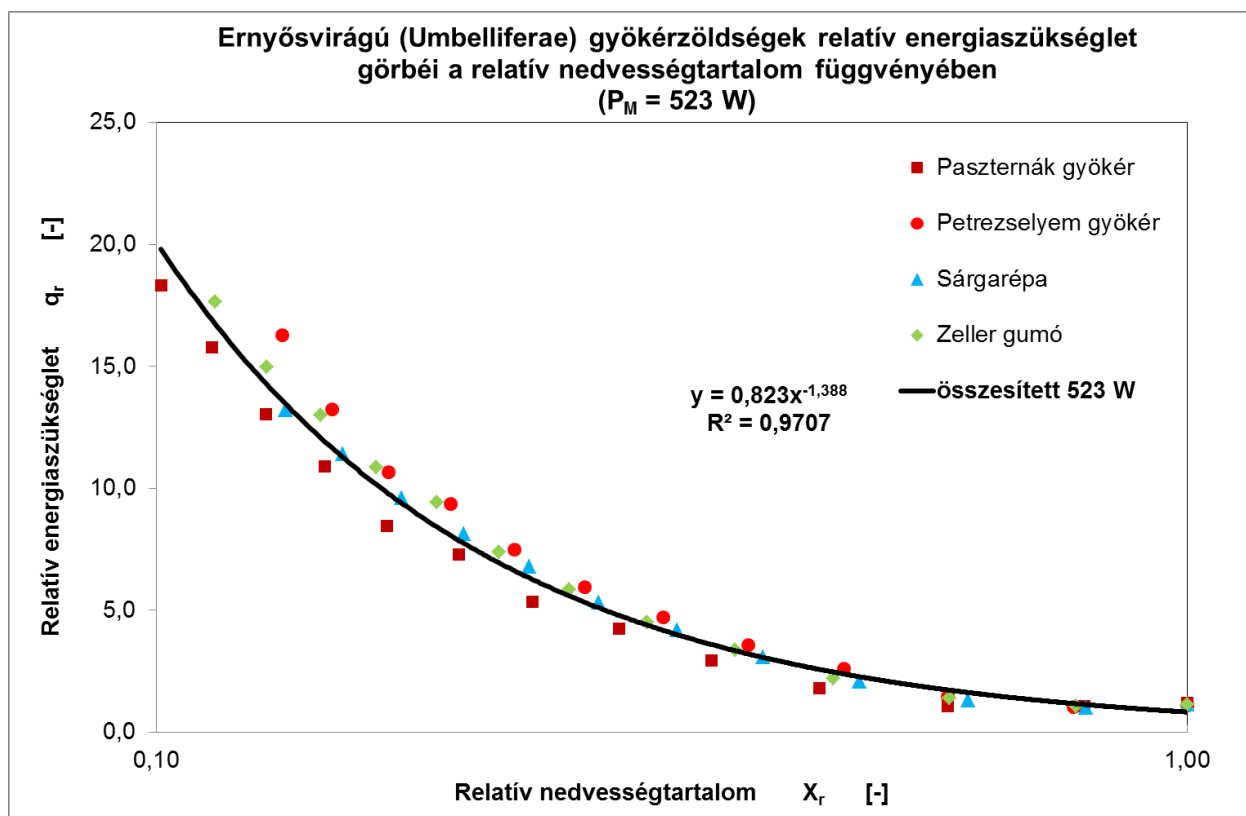
$$q_r = a \cdot X_r^b \quad (4.3)$$

A 4.18.-4.20. ábrákon a különböző teljesítményszintekhez tartozó összesített eredmények láthatóak. Az ábrákon megfigyelhető, hogy a teljesítményszint növelésével a függvény illesztési pontossága kismértékben csökken, ami arra utal, hogy a teljesítmény növelésével az egyedi vízleadási tulajdonságok közötti különbség erősebben kerül kifejezésre.

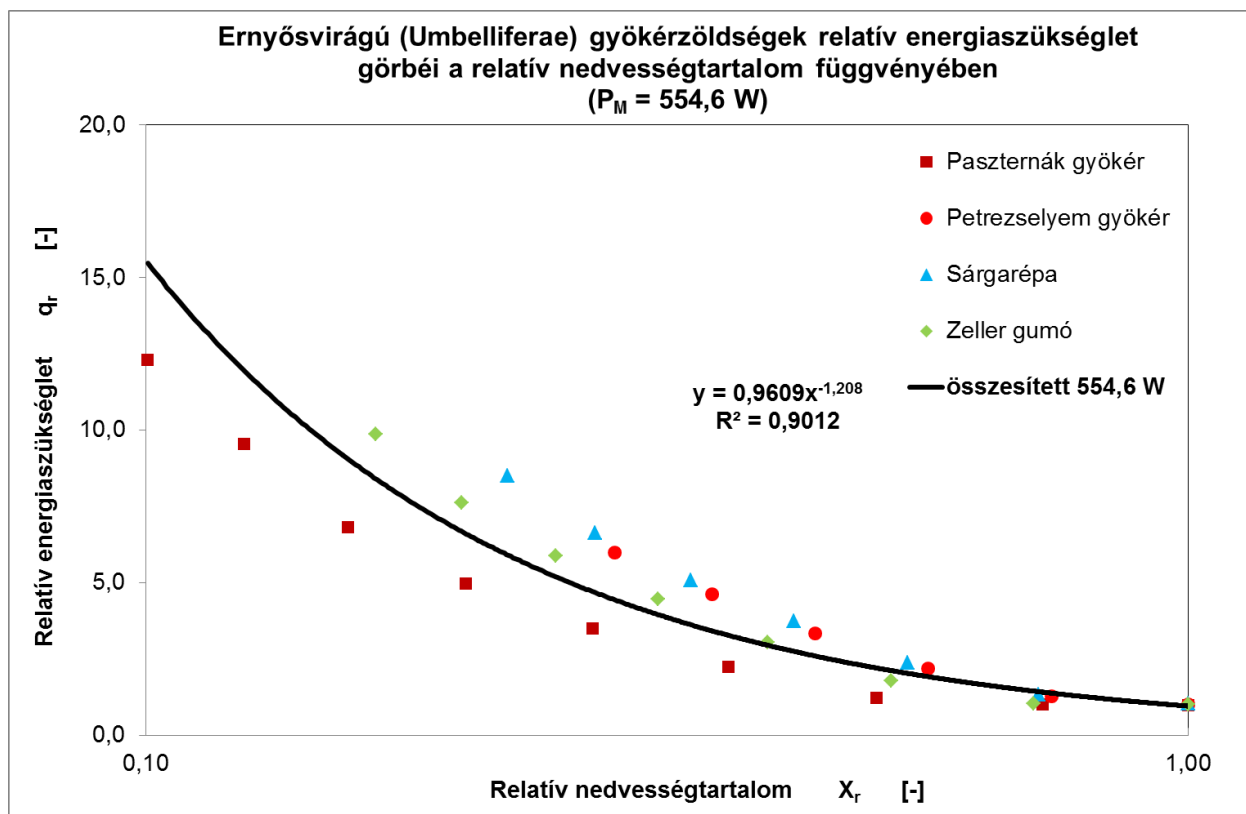
A 4.21. ábrán, a 3 teljesítményszinten kapott összesített görbét ábrázoltam. Ez alapján jól látszik, hogy a teljesítmény növelése több szempontból módosítja az energiafelhasználás folyamatát. Egyrészt megfigyelhető, hogy a teljesítmény növelése során a görbék meredeksége csökken, ami arra utal, hogy a relatív energiaszükséglet növekedési szakaszának kezdőpontja a nagyobb nedvességtartalom irányába tolódik el. Ugyanakkor a teljesítmény növelésével a relatív energiaszükséglet maximális értékei jelentős mértékben csökkennek. A gyökérzöldségek csoportjára vonatkoztatva ez azt jelenti, hogy a 456,8 W-os teljesítményszinten történő szárítás relatív energiaszükséglete több mint duplája az 554,6 W-os szintnek.



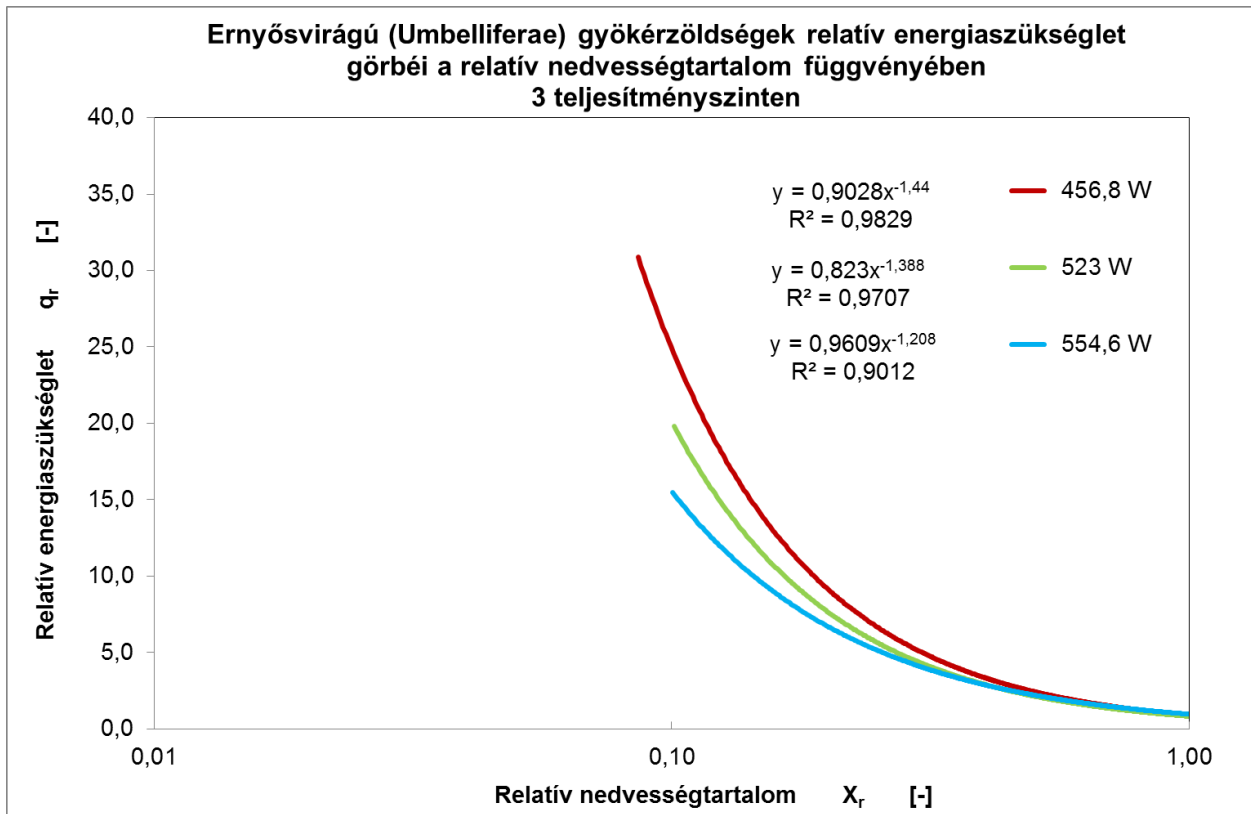
4.18. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a relatív nedvességtartalom függvényében (456,8 W)



4.19. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a relatív nedvességtartalom függvényében (523 W)



4.20. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a relatív nedvességtartalom függvényében (554,6 W)

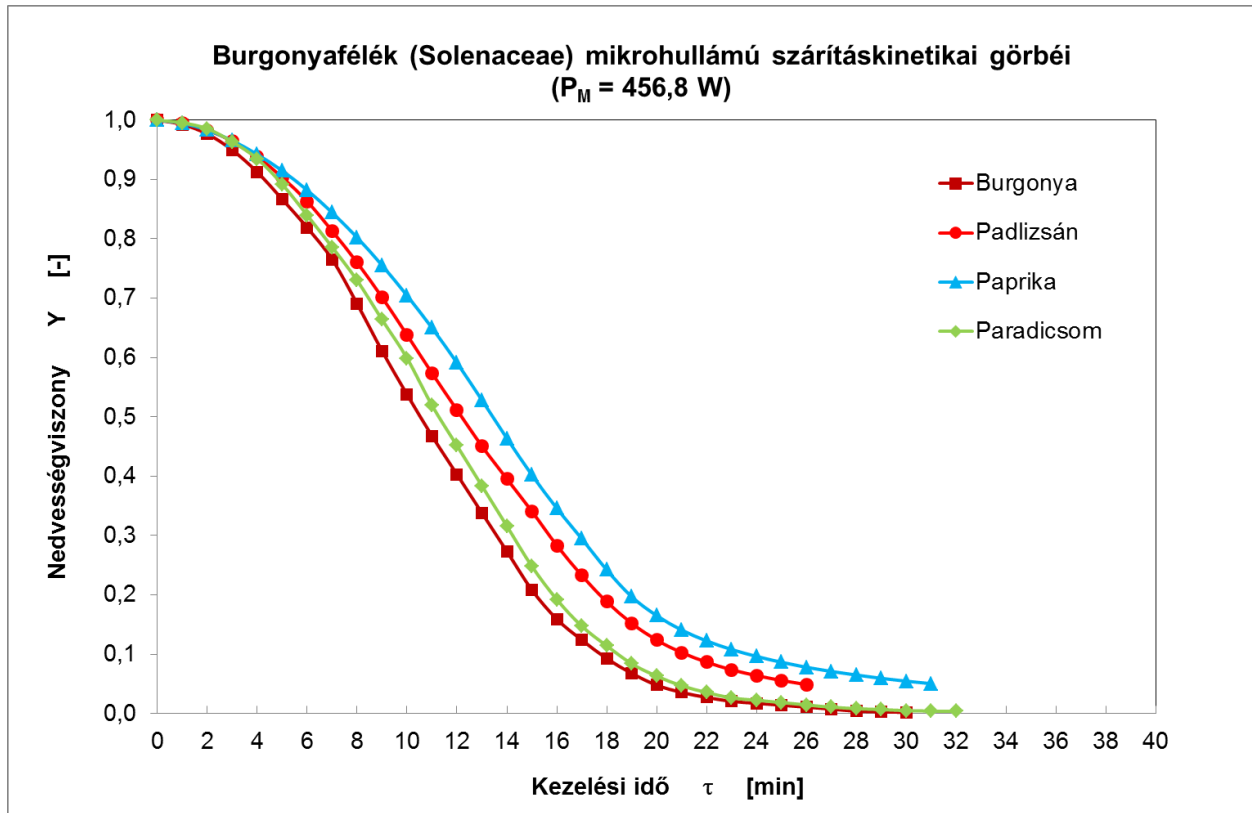


4.21. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) gyökérzöldségek relatív energiaszükséglet görbéi a relatív nedvességtartalom függvényében 3 teljesítményszinten

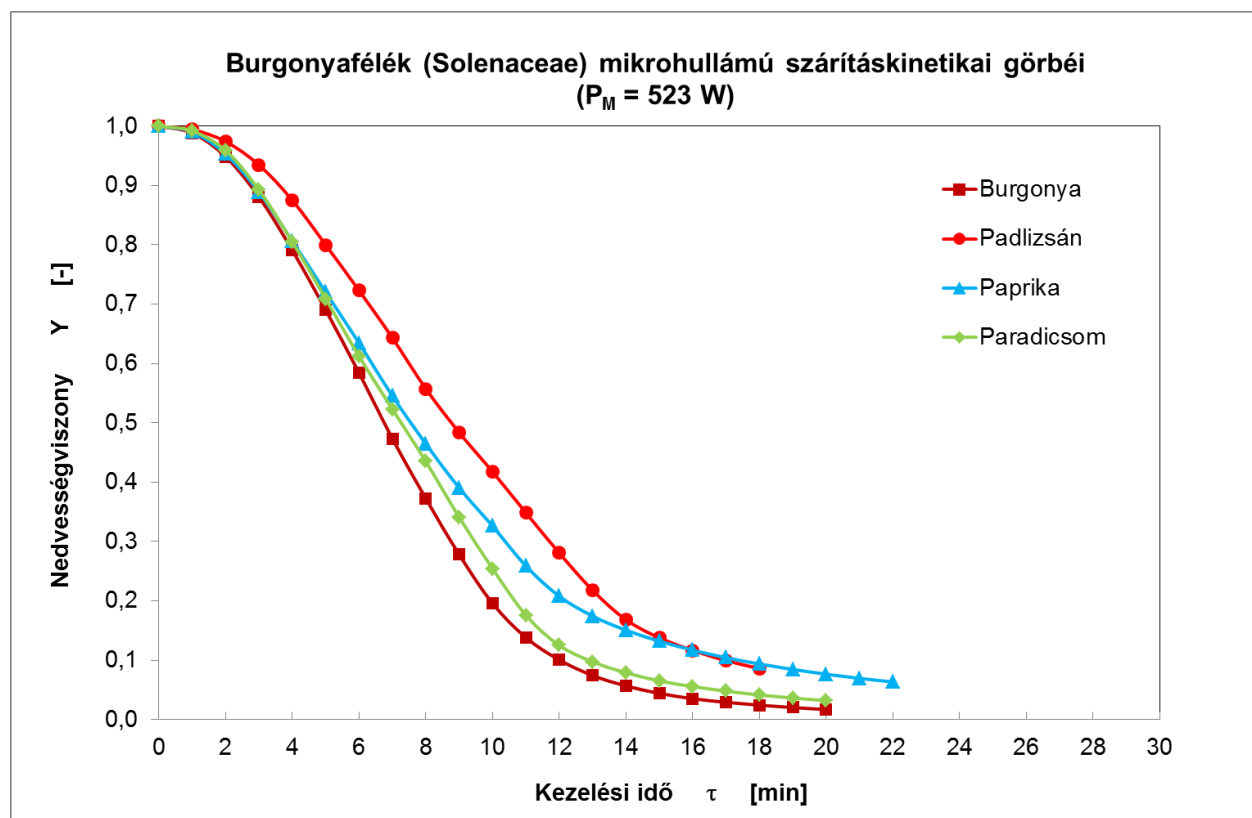
4.3. A burgonyafélék vizsgálata

A burgonyafélék vizsgálati adatainak feldolgozása nagymértékben megegyezett a gyökérzöldségeknél ismertetett módszerrel. A csoport egyes tagjainak mérési eredményeit az M3.5.-M3.8. melléklet tartalmazza. Mivel itt is eltérő volt az egyes vizsgált növényfélések kezdeti nedvességtartalma, ezért első lépésként ennél a növénycsoportnál is a nedvességviszony görbéket vettem fel (4.22. - 4.24. ábra). A klasszikus száradási görbe alak a burgonyafélék szárítása során is megfigyelhető, de ezen a növénycsoporton belül a morfológiai különbségek nagyobbak, mint a gyökérzöldségeknél, így a kapott görbék is nagyobb eltéréseket mutatnak, amelyek főként a szárítási folyamat végső szakaszán jelentkeznek. Ez az eltérés nagyobb teljesítmény alkalmazása esetén csökken ugyan, de még a legmagasabb szinten is mutatkozik némi különbség. Hasonlóan a gyökérzöldségeknél tapasztaltakkal, a kezdeti nedvességtartalomban megjelenő eltérések befolyásolják a vízleadási folyamatot. Ennek következtében a burgonya szárítási görbéi rendre a legmeredekebbre adódtak a 3 másik jóval magasabb kezdeti nedvességtartalommal rendelkező növényhez viszonyítva. A nedvességtartalomban mutatkozó eltérés egyik fő oka, hogy a kísérletek során a burgonya megvastagodott szárképletét szárítottam, míg a többi növénynek a termését. Emellett a termések felépítésében is jelentkezik kismértékű különbség, hiszen míg a padlizsán közel homogén, tömör szerkezetű terméshússal rendelkezik, addig a paprika terméshúsa sokkal vékonyabb, héj jellegű szerkezettel rendelkezik.

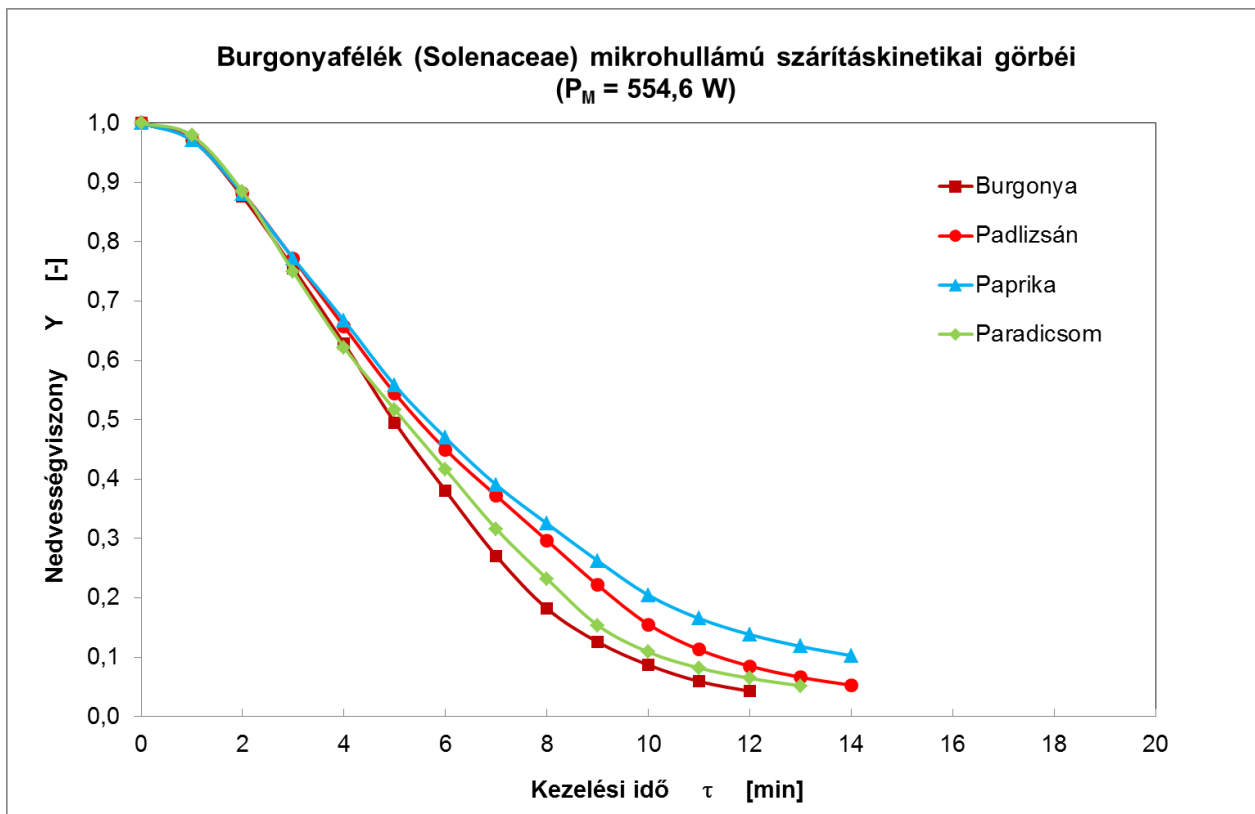
A 3 teljesítményszint görbéit összehasonlítva a burgonyafélékre is igaz, hogy a mikrohullámú teljesítmény növelésével a kezelési idők egyre rövidülnek. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a 456,8 W-os szinten - növénytől függően – 26-32 perc, az 523 W-os szinten 20-22 perc, illetve az 554,6 W-os szinten 12-14 perc volt a szárítás időtartama.



4.22. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) száradási görbái (456,8 W)

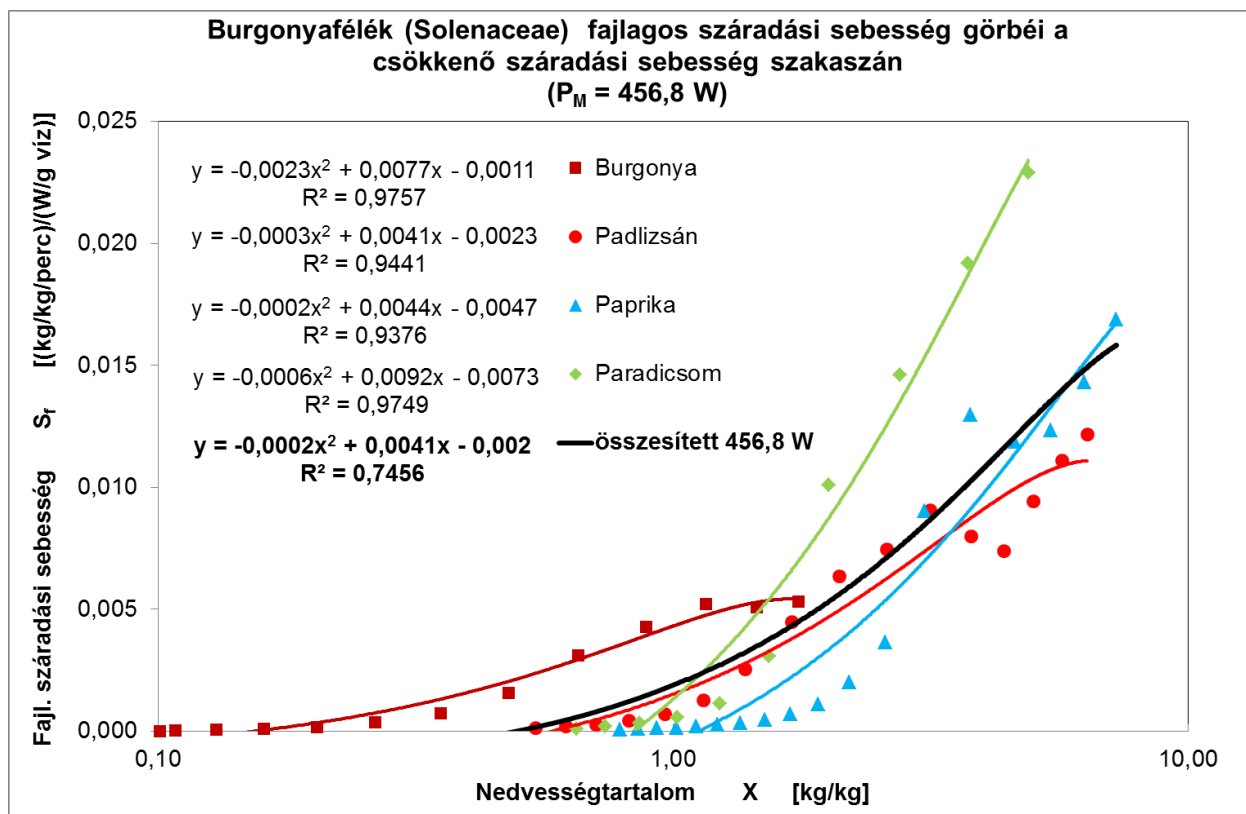


4.23. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) száradási görbái (523 W)

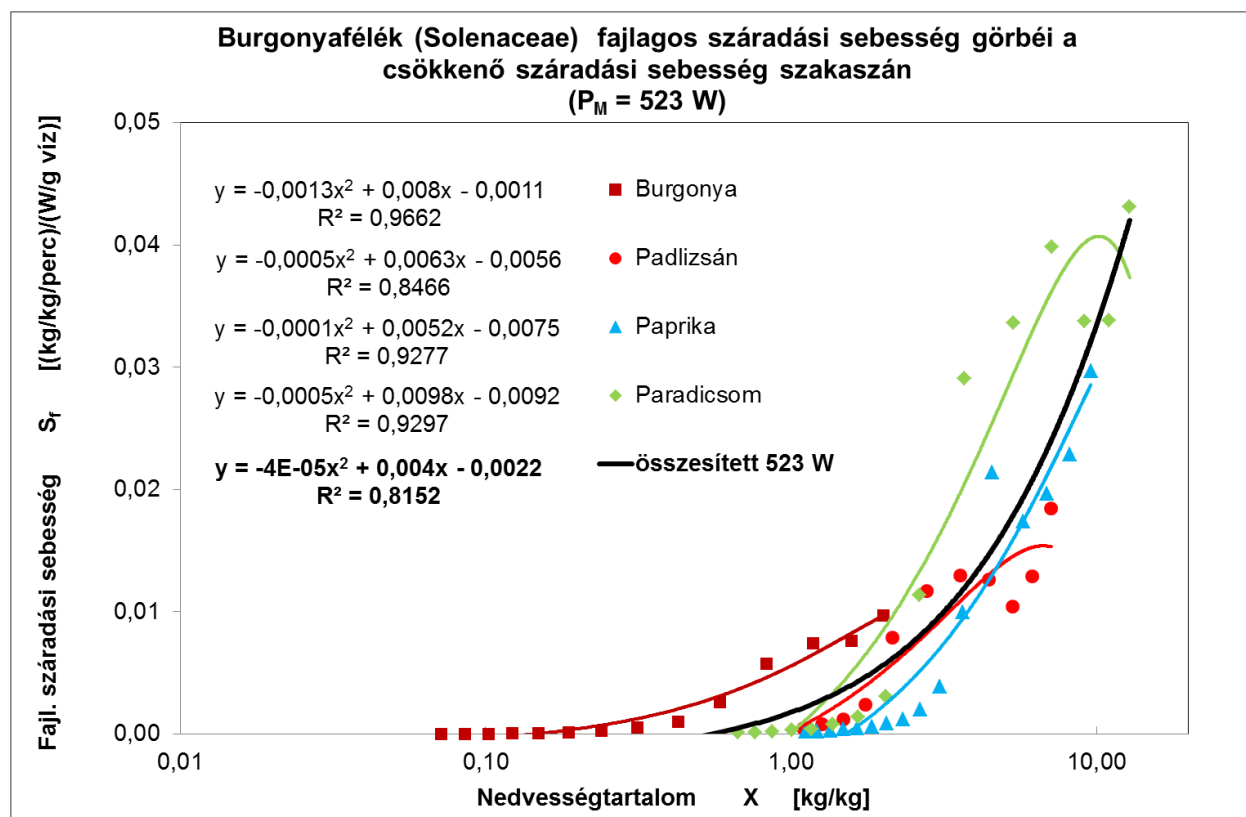


4.24. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) száradási görbéi (554,6 W)

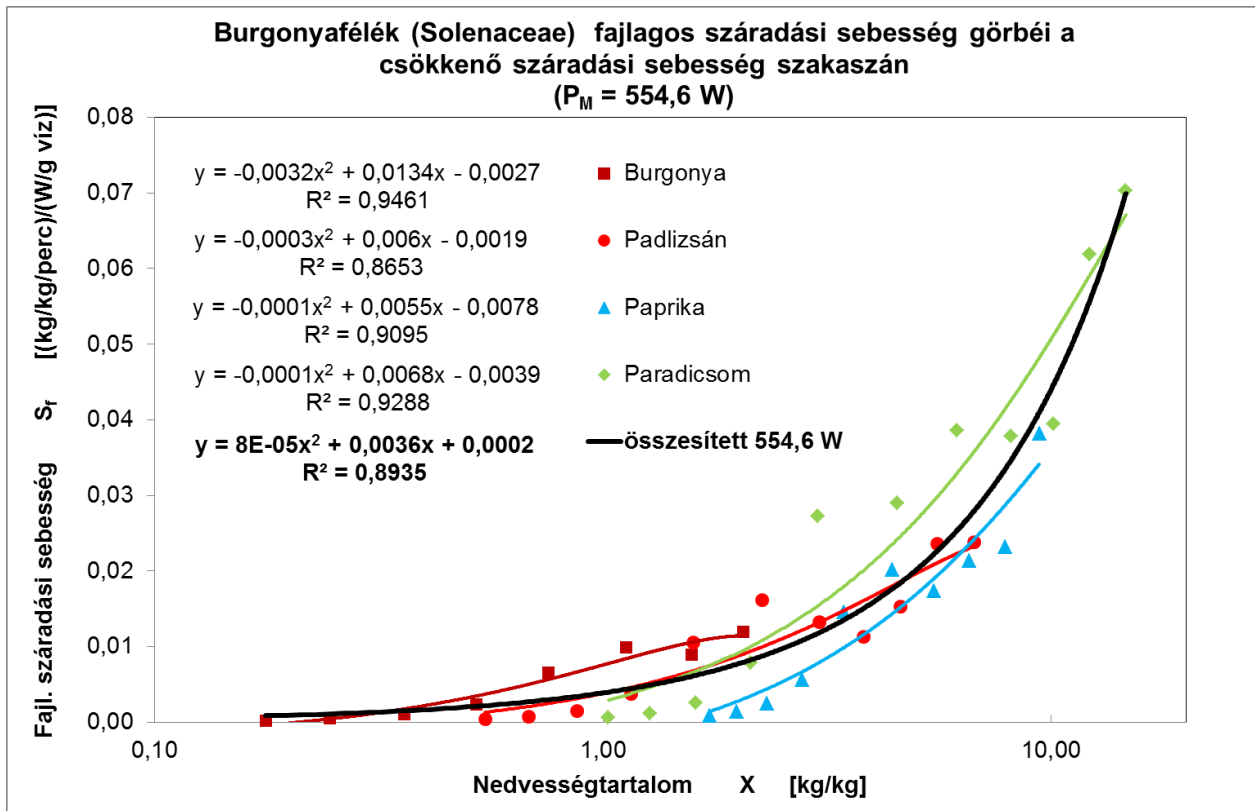
A burgonyafélék elemzését a növényenkénti száradási sebesség, ezután a fajlagos száradási sebesség görbék felvételével folytattam, amelyek tendenciájukban nagymértékű hasonlóságot mutattak a gyökérzöldségeknél tapasztaltakkal (4.25. - 4.27. ábra). A görbék itt is hasonló formájú, másodfokú egyenlettel (4.1) voltak megadhatók, amelyek csak az együtthatók értékében különböztek a gyökérzöldség egyenletektől. Az egyes növényekhez tartozó egyenleteket és a korrelációs együtthatók értékét az ábrán tüntettem fel. Az egyenletek meglehetősen jól illeszkednek, hiszen a korrelációs együttható értéke minden esetben nagyobb, mint 0,84. Az összesített görbék illeszthetősége kis mértékben csökkent, főként a már korábban említett morfológiai tulajdonságok következtében, de a 456,8 W teljesítményszinten kapott korrelációs együttható $R^2 = 0,74$ értéke mezőgazdasági anyagok szárításakor megfelelőnek tekinthető. Ráadásul, ha részletesen összevetjük az egyes teljesítményszinten kapott összesített görbéket (4.28. ábra) láthatjuk, hogy a teljesítményszint növelésével az illesztés egyre pontosabbá válik, vagyis az egyes növények vízleadási tulajdonságai egyre hasonlóbbá válnak. A fajlagos száradási sebesség értékek maximumát megvizsgálva, a gyökérzöldségekhez hasonlóan a burgonyaféléknél is megfigyelhető, hogy a fajlagos száradási sebesség értéke növekszik, a mikrohullámú teljesítmény növelésével. Ugyanakkor jelentős eltérés mutatkozik ebben az esetben a növekedés mértékében. Míg a gyökérzöldségek esetén a fajlagos száradási sebesség növekedése közel 3-szoros volt, addig a burgonyafélék esetén ez közel 5-szörös értékre változik.



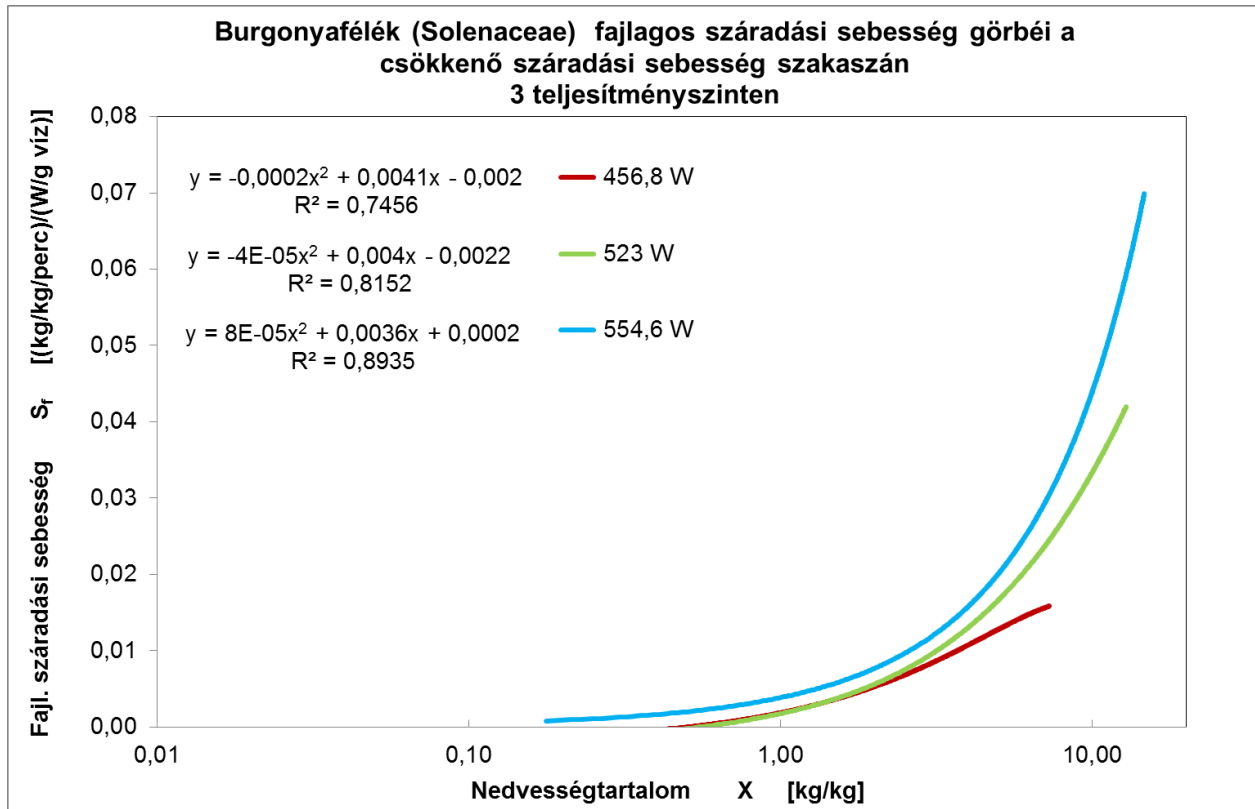
4.25. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán ($456,8 \text{ W}$)



4.26. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (523 W)



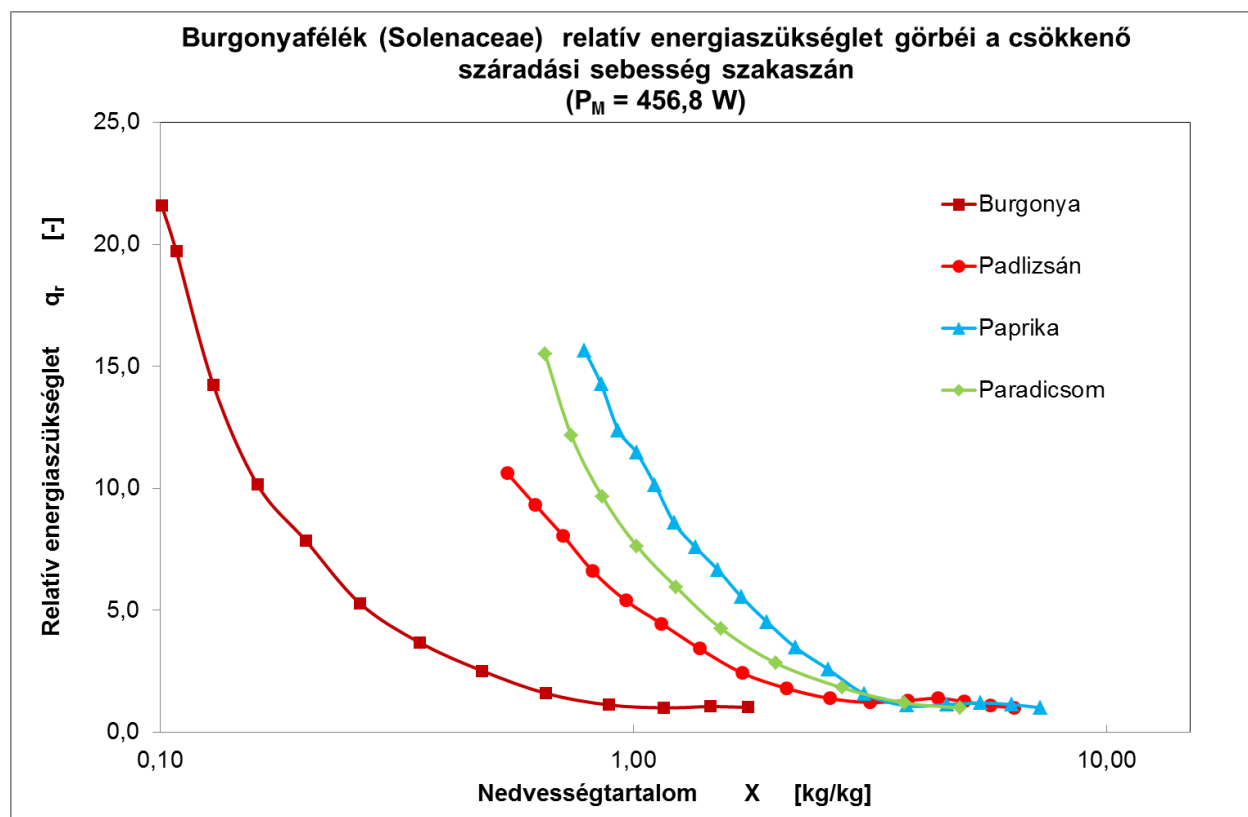
4.27. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (554,6 W)



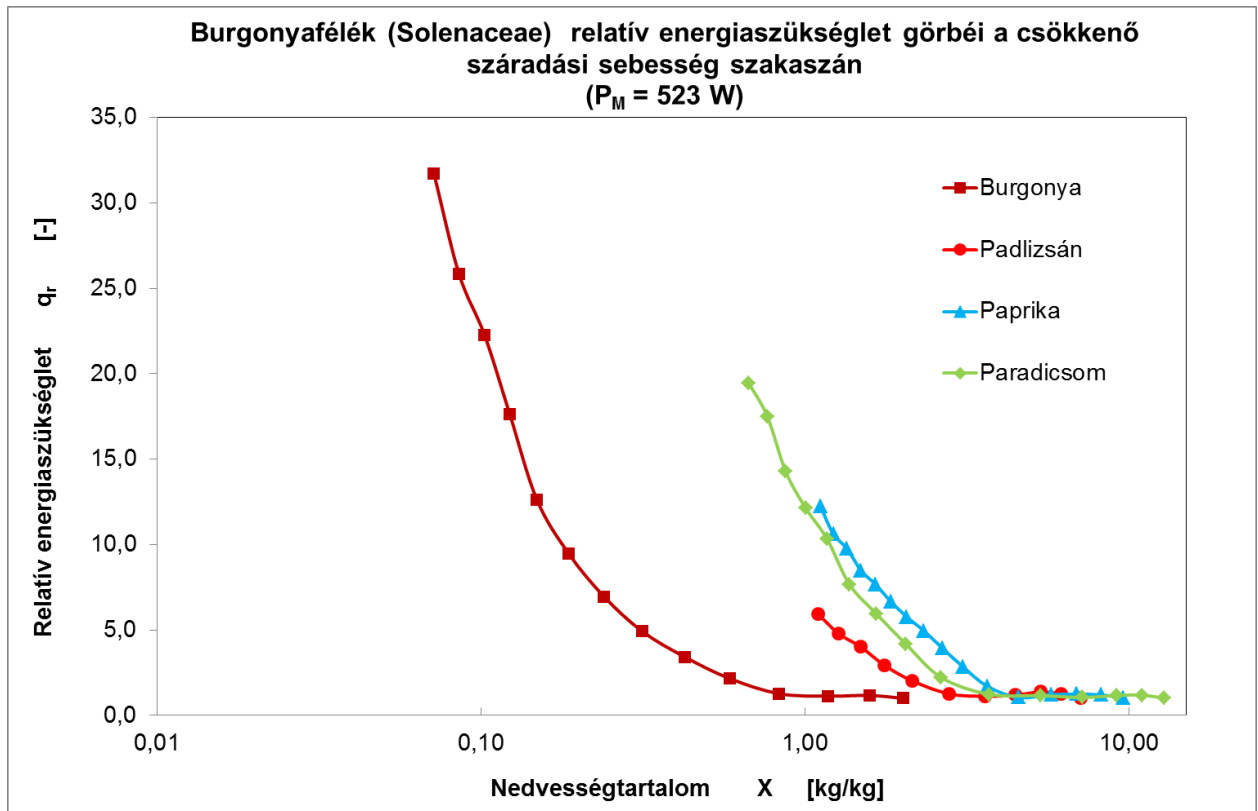
4.28. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán 3 teljesítményszinten

A száradási folyamatok energetikai viszonyainak bemutatásához a burgonyaféléknél is meghatároztam az energiaszükséglet fajlagos értékeit, majd ezek segítségével, a korábban ismertetett módon, relatív energiaszükséglet értékeket képeztem, amelyet a száraz bázison számított nedvességtartalom függvényében ábrázoltam (4.29 - 4.31. ábra). Az ábrákon ebben az esetben is jól látható és elkülöníthető a két részre tagolódó a relatív energiaszükséglet leíró görbe. A nagyobb nedvességtartalmak tartományában a relatív energiaszükséglet állandónak tekinthető, míg az alacsonyabb nedvességtartalomnál intenzív növekedés látható. Ez két szakaszra osztható folyamat teljes egészében megegyezik a gyökérszöldségeknél kapott eredményekkel. Az is az energia felhasználás hasonlóságát erősíti, hogy megfigyelhető a két szakasz közötti átmenet határozottabb kialakulása az alkalmazott mikrohullámú teljesítmény növelésével.

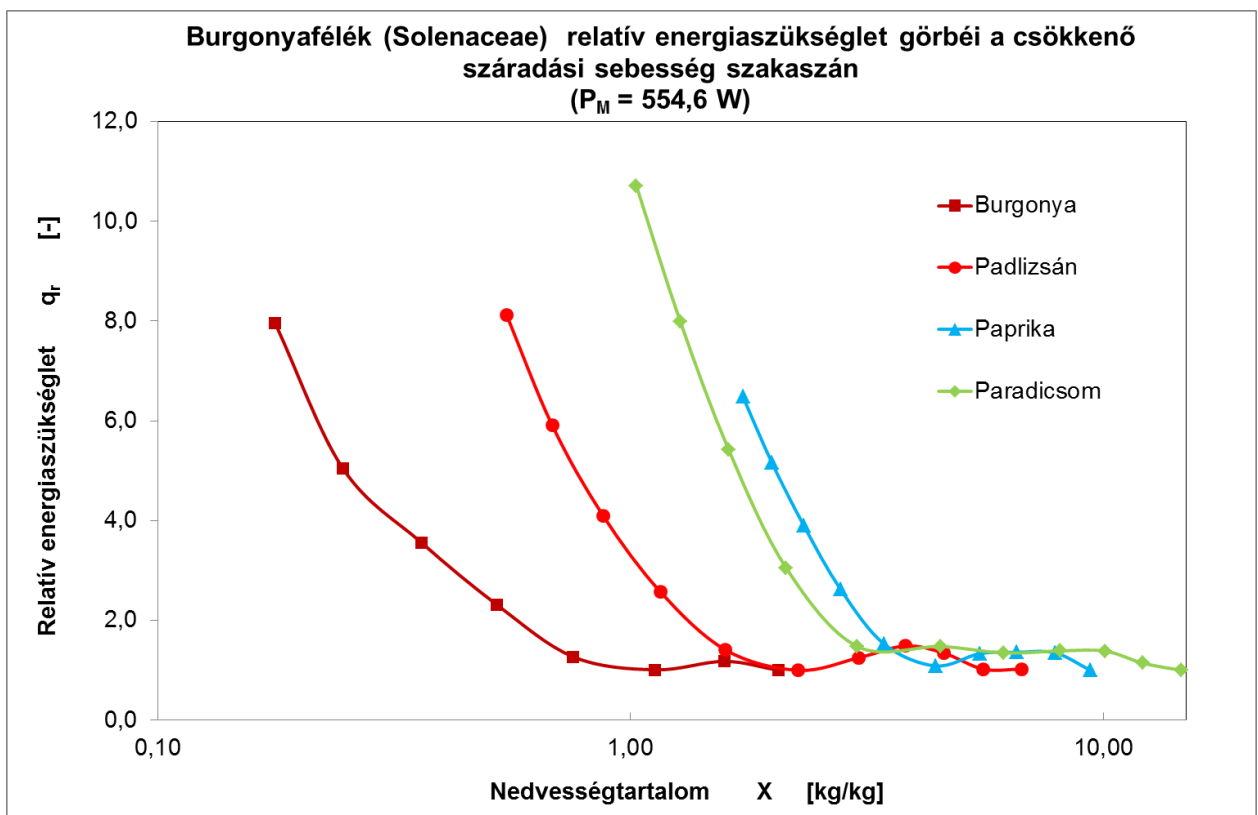
A növekedési szakasz elemzéséhez, a korábbiakhoz hasonló módon, növényenként meghatároztam a két szakasz elválasztó pontjához tartozó nedvességtartalom értéket. Az egyes növények kritikus pontjait összehasonlítva megállapítható, hogy a burgonyafélékre vonatkozó kritikus pont helyzete nem esik oly mértékben egybe, mint ahogyan az a gyökérszöldségeknél tapasztalható volt. Ennek oka egyrészt a kezdeti nedvességtartalomban mutatkozó nagyobb különbségek, másrészt az egyes növények közötti morfológiai eltérés. Ugyanakkor hasonlóan a gyökérszöldségeknél tapasztaltakhoz, a burgonyafélék esetén is megfigyelhető, hogy a kisebb kezdeti nedvességtartalommal rendelkező növények relatív energiaszükséglet görbéi az alacsonyabb nedvességtartalmak tartományában váltanak át az intenzív növekedési szakaszba. A kritikus pont helyének meghatározását követően, csak a növekedési szakaszra is felrajzoltam a diagramokat (4.32. - 4.34. ábra) és megvizsgáltam milyen függvény szerint megy végbe az energiaszükséglet növekedése. Az minden esetben látható, hogy a függvénykapcsolatot a gyökérszöldségeknél már felírt hatványfüggvénnyel (4.2) tudtam legpontosabban jellemezni. Az egyes teljesítményszinteken növényenként feltüntettem az egyenletek együtthatóit és korrelációs együtthatóit.



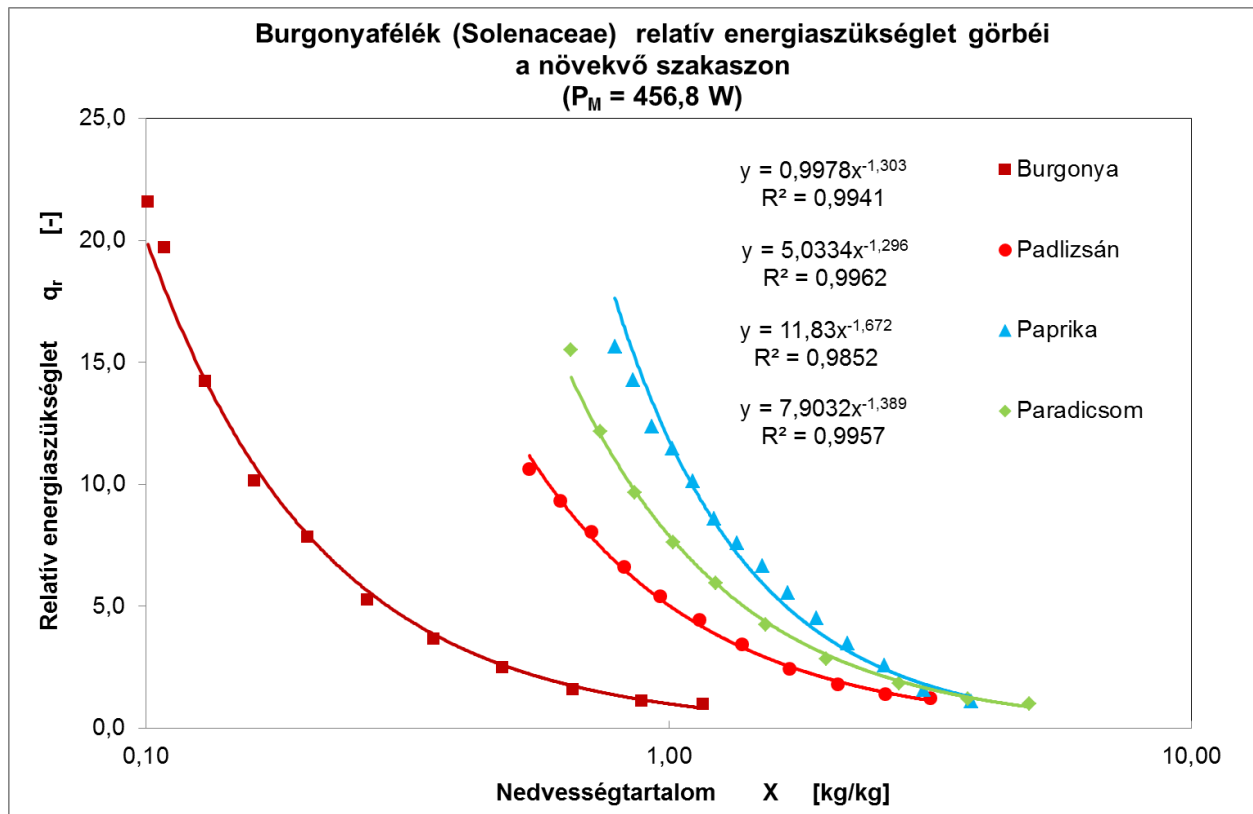
4.29. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (456,8 W)



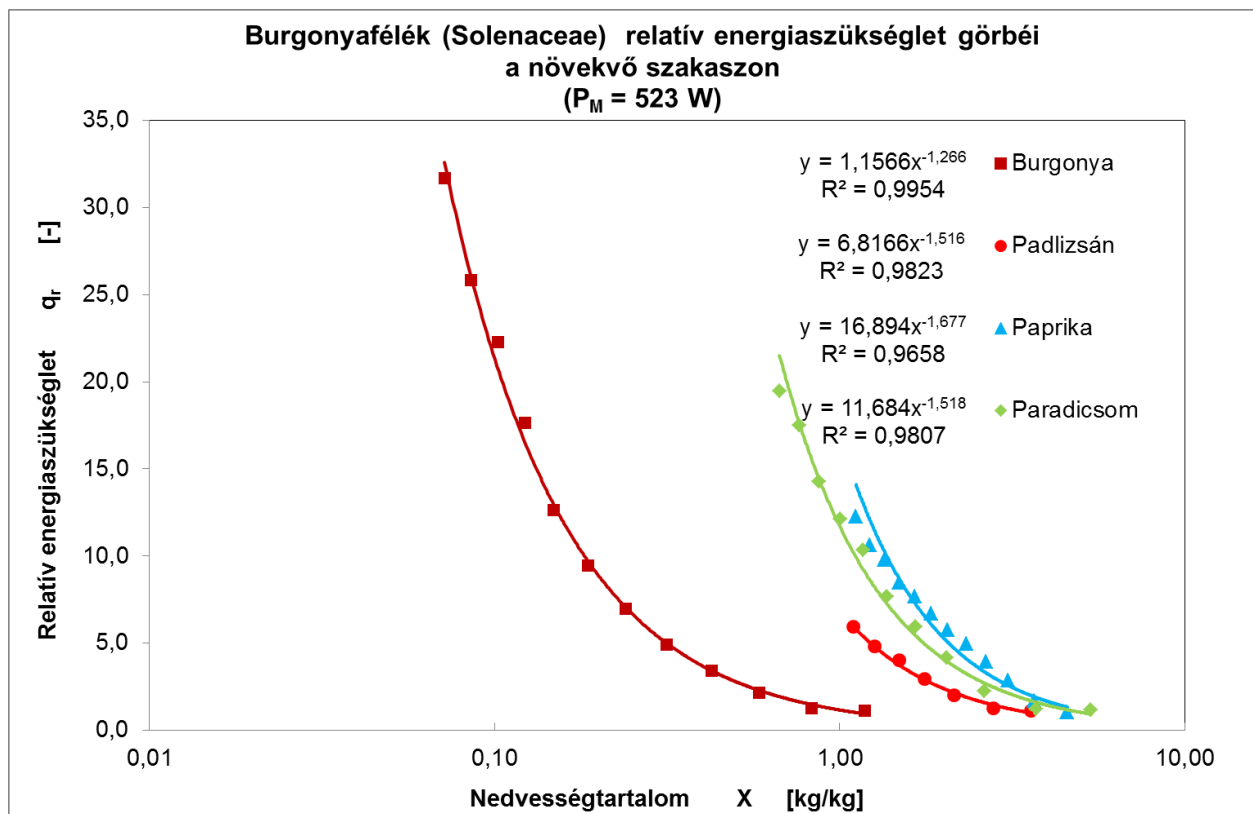
4.30. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (523 W)



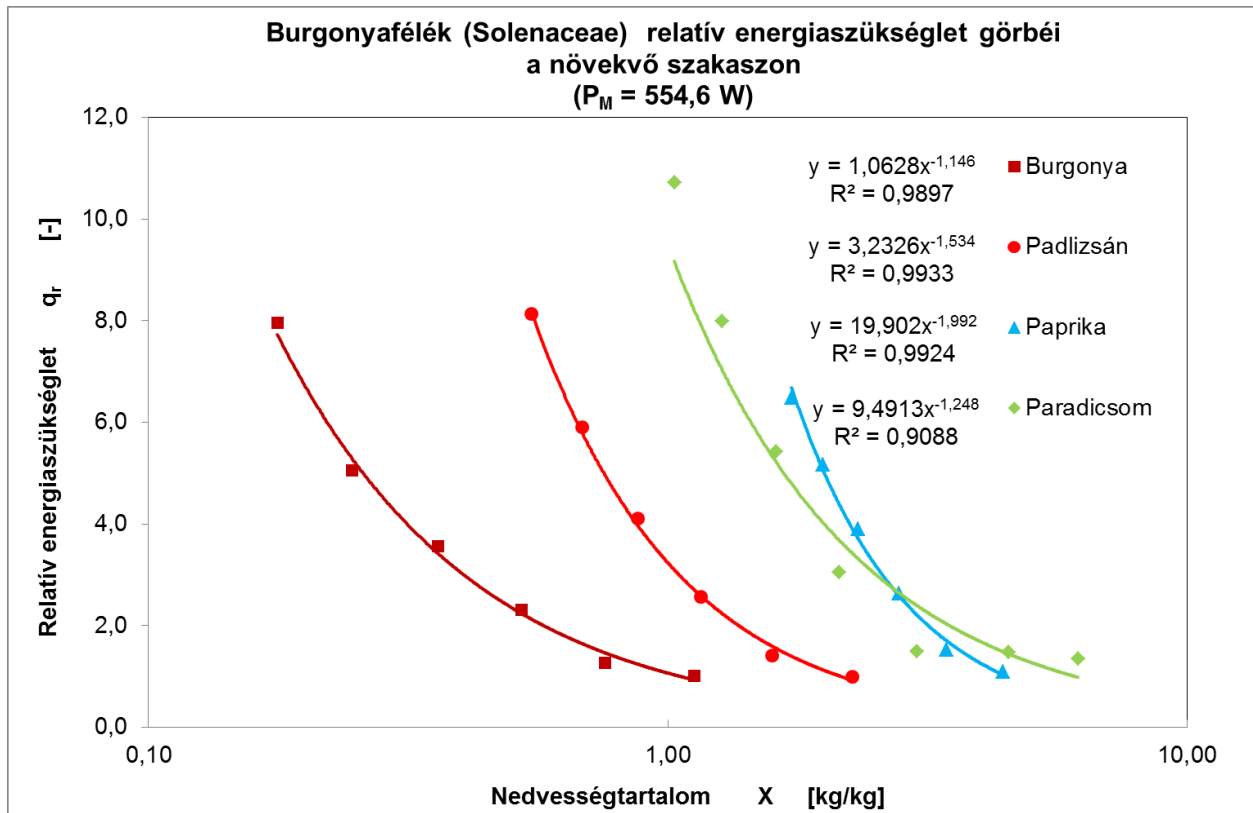
4.31. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán ($554,6 \text{ W}$)



4.32. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon ($456,8 \text{ W}$)



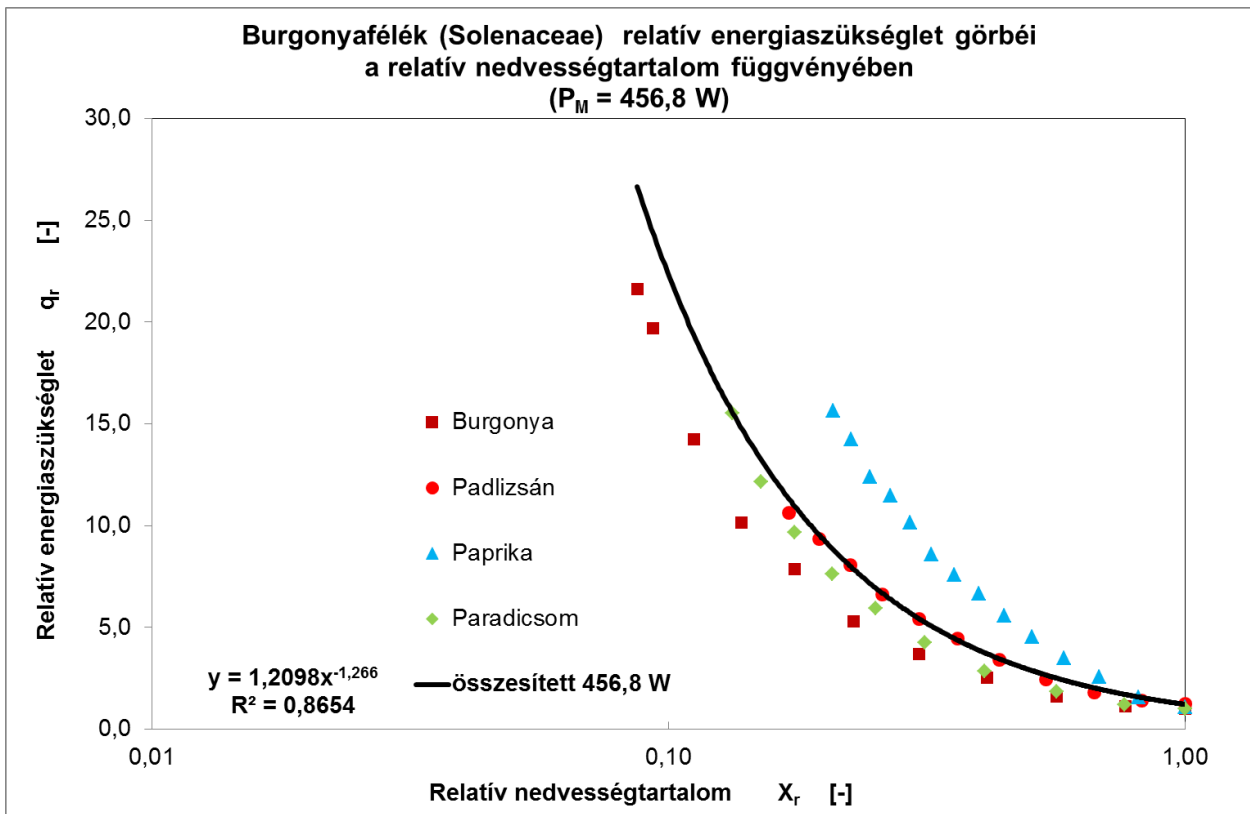
4.33. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon (523 W)



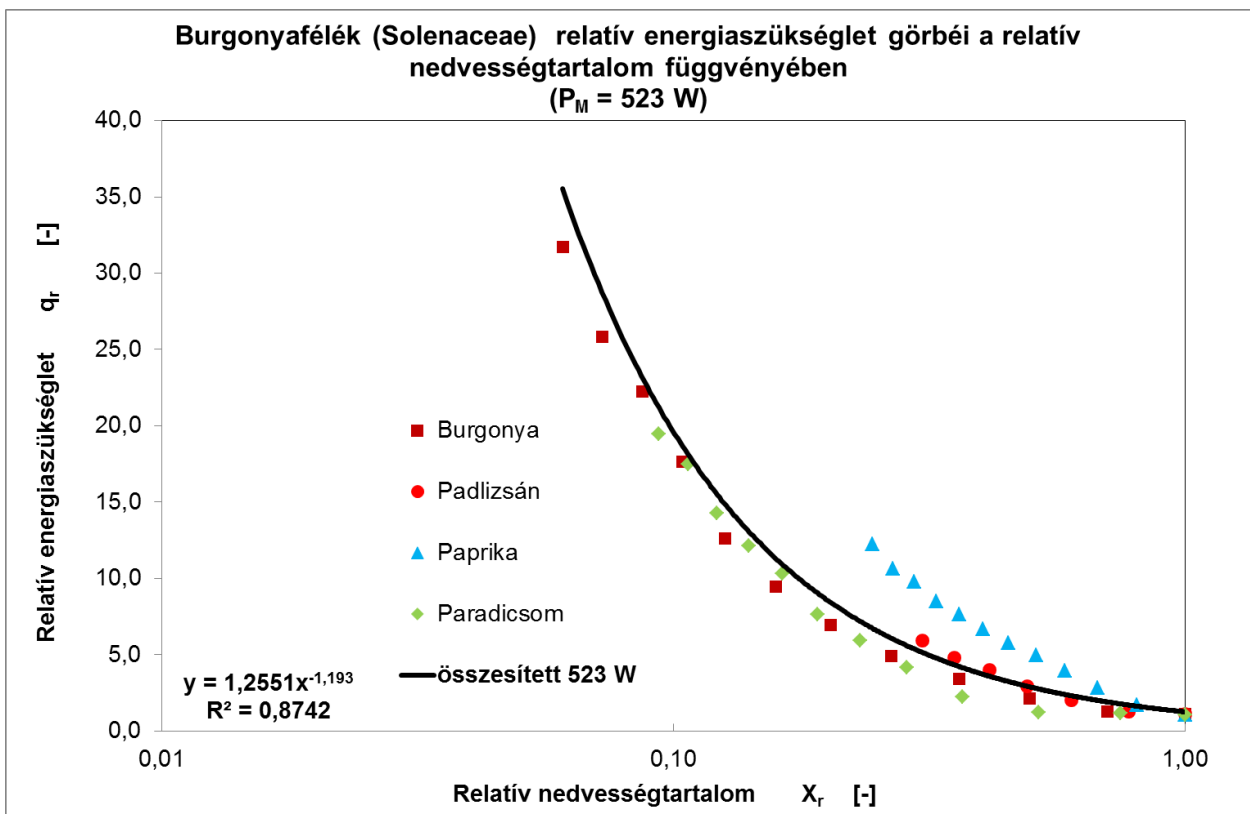
4.34. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbái a növekvő szakaszon ($554,6 \text{ W}$)

A vizsgálat utolsó részében az egyes teljesítményszintekhez tartozó relatív energiaszükségleteket hasonlítottam össze. Ehhez azonban a kritikus pontok különböző nedvességtartalmai miatt, a gyökérzöldségeknél már ismertetett módon egy kezdőpontot képeztem, amelyhez a relatív nedvességtartalom értékeket meghatároztam. Ezután az 4 növény összes relatív energiaszükségleti pontját a relatív nedvességtartalom függvényében ábrázoltam (4.35. - 4.37. ábra). Az összes pontra illesztett görbe egyenlete megegyezett a gyökérzöldségek esetén már felírt hatványfüggvénnyel (4.3). Az illesztés pontossága kissé alacsonyabb a gyökérzöldségekhez viszonyítva, ami több okra vezethető vissza. Egyrésztől minden teljesítményszinten megfigyelhető, hogy a paprika relatív energiaszükséglet értékei kissé eltérő, meredekebb tendenciát mutatnak a többi 3 növényhez képest. Ennek oka a szárított minták különbözőségéből adódik. A paprika mintákat nem lehetett tökéletes kocka alakúra vágni a vékonyabb terméshús miatt, ezért az egységnyi mintákból fajlagosan kisebb vízmennyiséget kellett elpárologtatni, amelynek eredményeképpen a nedvesség leadás eltérő módon megy végbe, mint a többi növény esetében. Másrésztől a termények vízleadását befolyásoló morfológiai jellemzők ebben a csoportban nem mutatnak akkora hasonlóságot, mint a gyökérzöldségek esetén.

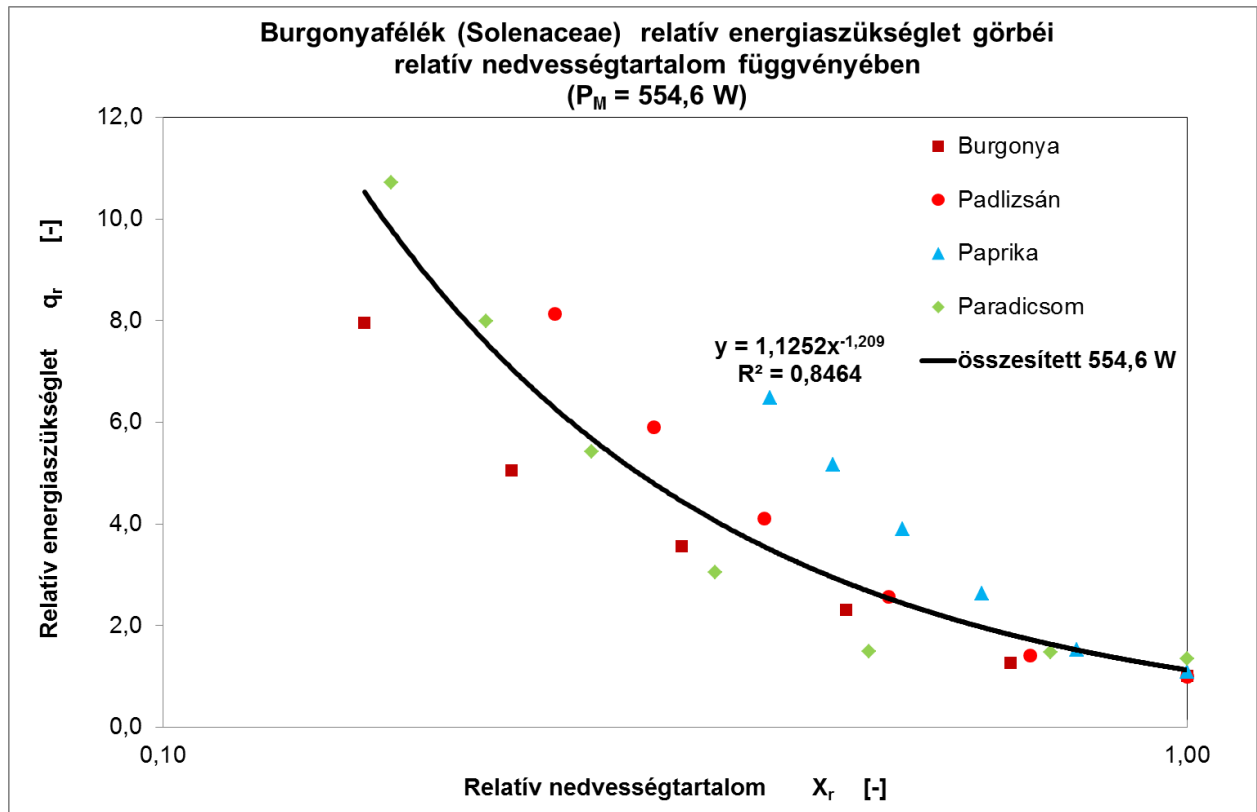
A 4.38. ábrán különböző teljesítményszinthez tartozó összesített görbéket együtt ábrázoltam. Az itt látható görbék egyértelműen ugyanazt az összefüggést mutatják a relatív energiaszükséglet és a relatív száraz bázison mért nedvességtartalom között, mint az a gyökérzöldségek esetén látható volt, vagyis a teljesítmény növelésével a relatív energiaszükséglet görbéinek meredeksége csökken. A burgonyafélékre is igaz tehát, hogy a nagyobb mikrohullámú teljesítmény alkalmazása a kritikus pont helyzetét a nagyobb nedvességtartalom irányába tolja el.



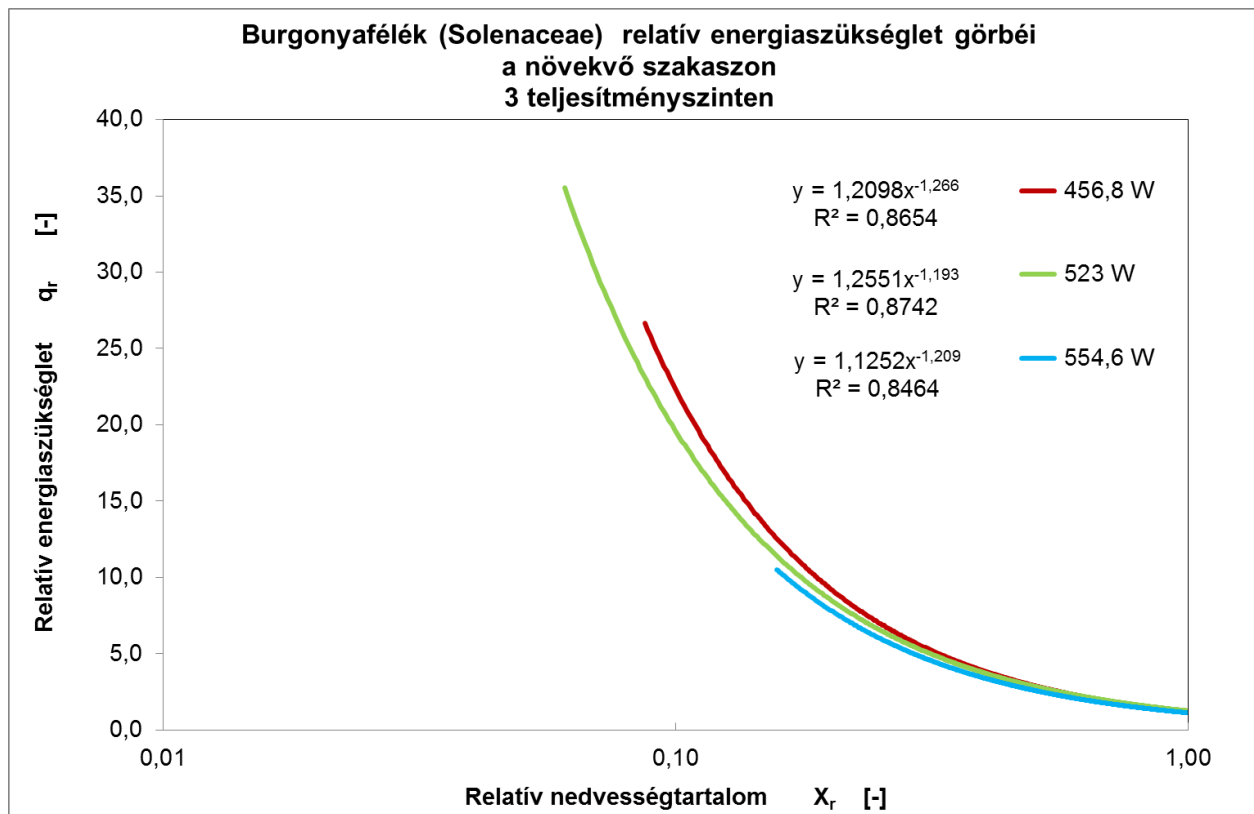
4.35. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon, a relatív nedvességtartalom függvényében (456,8 W)



4.36. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon, a relatív nedvességtartalom függvényében (523 W)



4.37. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon, a relatív nedvességtartalom függvényében (554,6 W)



4.38. ábra A Burgonyafélék (Solenaceae) relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon, 3 teljesítményszinten, a relatív nedvességtartalom függvényében

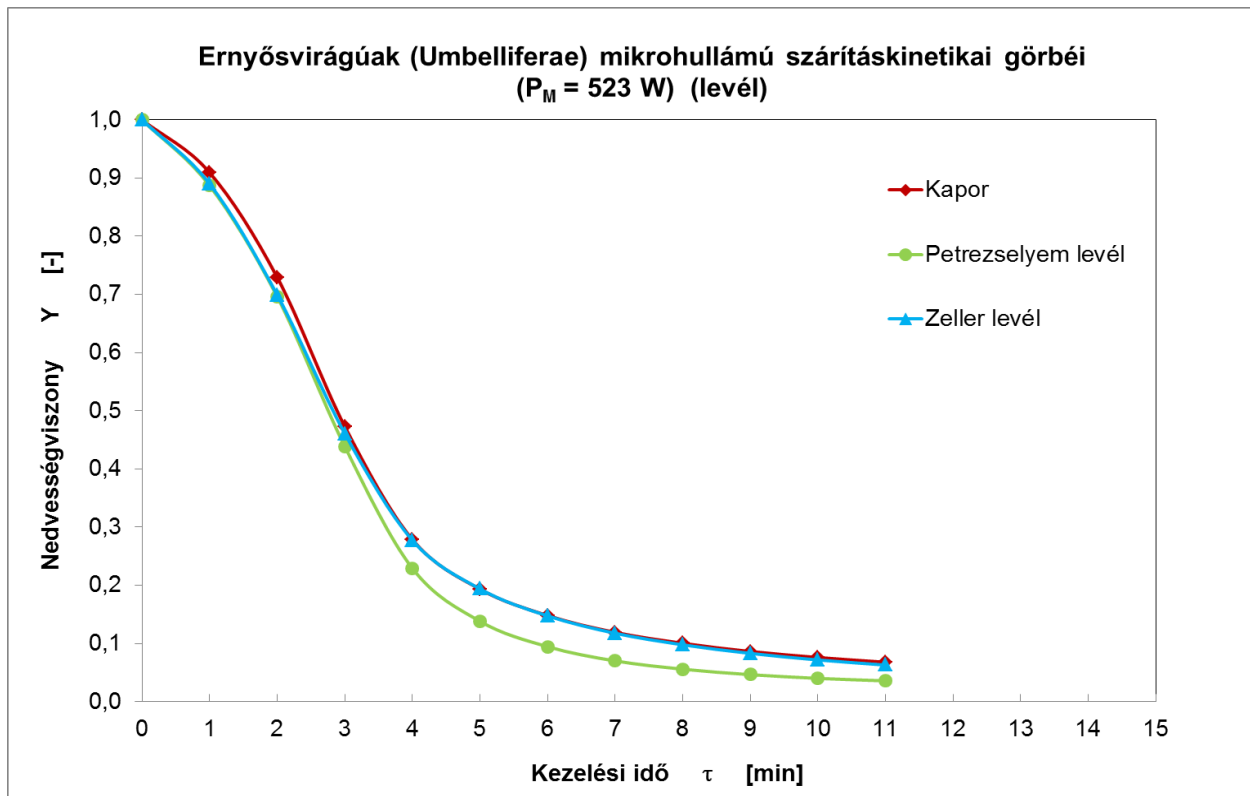
4.4. Az ernyősvirágú levélzöltségek vizsgálata

Az előző fejezetekben a gyökérzöltségek és a burgonyafélék csoportjára adott megállapítások ellenőrzésére az ernyősvirágú növények levélzetének szárítását választottam, mivel a növény ezen része morfológiai felépítésben jelentősen eltér az előző két csoporttól.

A levélzöltségek szárítási módszere részben eltért ugyan a másik két csoport méréseitől, de az így kapott eredmények is alátámasztják a korábbi összefüggéseket. A mikrohullámú mintatér kitöltöttsége a levélzöltségek esetén több mint kétszerese a burgonyafélék vagy gyökérzöltségek térkitöltésének, viszont a minta tömege mindössze 25 g volt a korábbi 80 g-hoz képest.

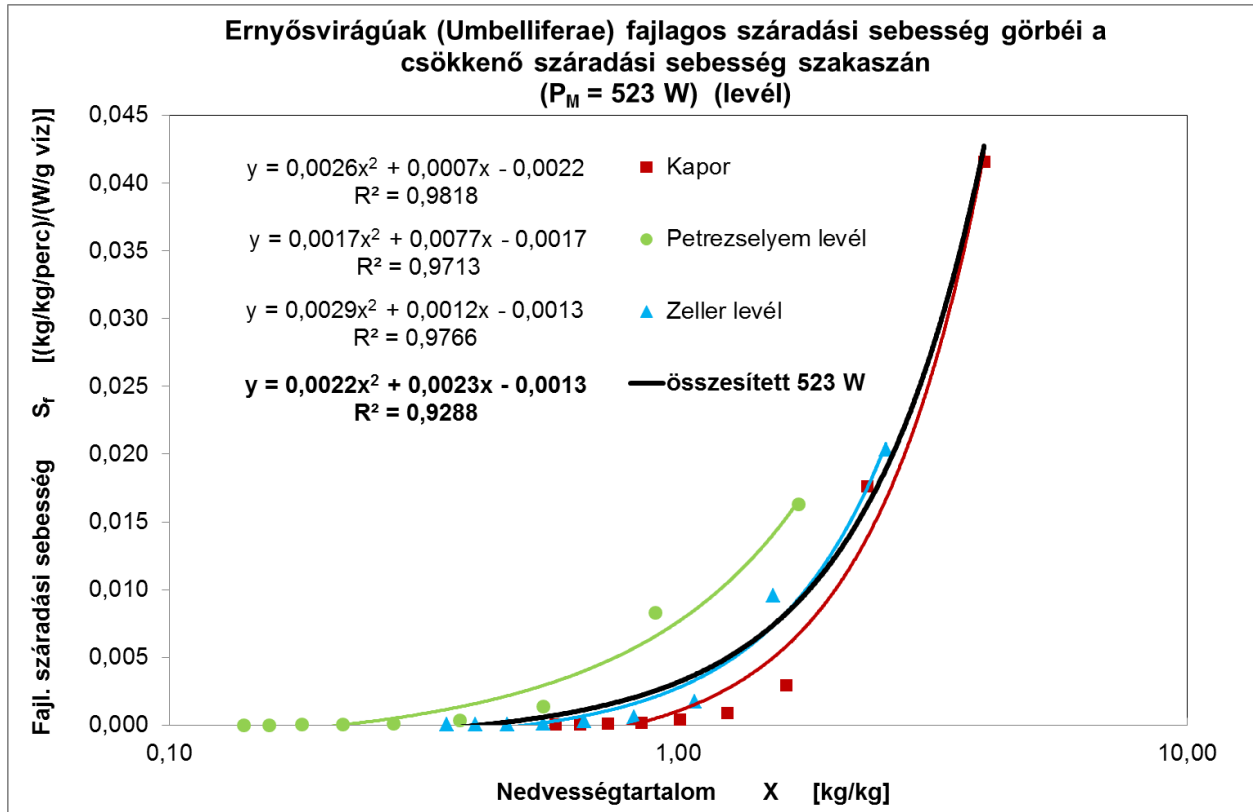
Az ellenőrzési teljesítményszintnek a középső 523 W-os szintet választottam, kiküszöbölve a túl nagy illetve túl alacsony teljesítményből következő esetleges hátrányokat. Ezen a teljesítményen 3 féle levélzöltséget vizsgáltam, amelyek eredményeit a 4.1. fejezetben leírtaknak megfelelően elemeztem ki, majd az eredményeket grafikusán ábrázoltam. Az egyes növények mérési adatait az M3.9.-M3.11. mellékletek tartalmazzák.

Elsőként a szárításkinetikai görbéket vettem fel, de ebben a növénycsoportban is jelentős eltérések voltak a kezdeti nedvességtartalomban, ezért itt is a nedvességviszony értékeit ábrázoltam a kezelési idő függvényében (4.39. ábra). A görbék alakja a mikrohullámú energiaközlésnek megfelelően alakul, a kezelés megkezdését követően azonnal meredeken csökken a nedvességtartalom. Amint az ábrán látszik, az egyes növények görbéi a teljes kezelési idő alatt szinte együtt futnak, vagyis a növénycsoport tagjainak vízleadási intenzitása is nagyon hasonló egymáshoz. A magas kezdeti nedvességtartalom ellenére a kezelési idő mindössze 11 perc volt minden növény esetében, ami a kisebb minta tömegnek köszönhető. Amint az ábrán látható a kezdeti nedvességtartalom különbségei meghatározzák a szárításkinetikai görbék alakját. Szemléletes példa erre a legalacsonyabb kezdeti nedvességtartalommal rendelkező petrezselyem levél, amelynek görbéje főleg a szárítás utolsó szakaszán elválik a csoport többi tagjának görbéitől.



4.39. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) levélzöltségek száradási görbéi (523 W)

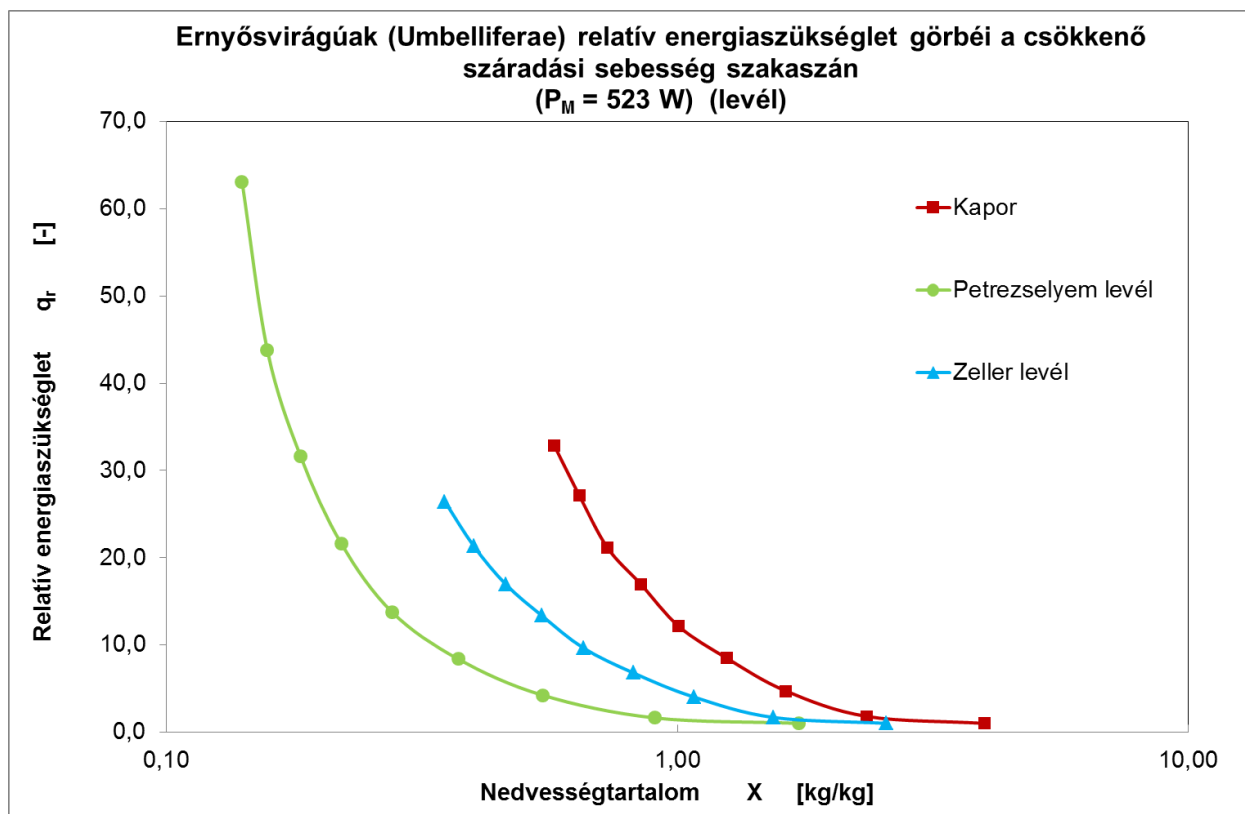
A vízleadás hasonlóságára tett megállapítást a fajlagos száradási sebesség görbék is alátámasztják (4.40. ábra). Ezen az ábrán egyértelműen látható, hogy az egyes növények fajlagos száradási sebesség értékei is egységesen alakulnak. A teljes csoportra vonatkozó másodfokú összesített függvény – a gyökérzöldségekhez és a burgonyafélékhez hasonlóan - a levélzöldségek esetén is nagy pontossággal illeszthető az összes mérési pontra. Az egyenletek együtthatóit és a korrelációs együttható értékét az ábrán tüntettem fel.



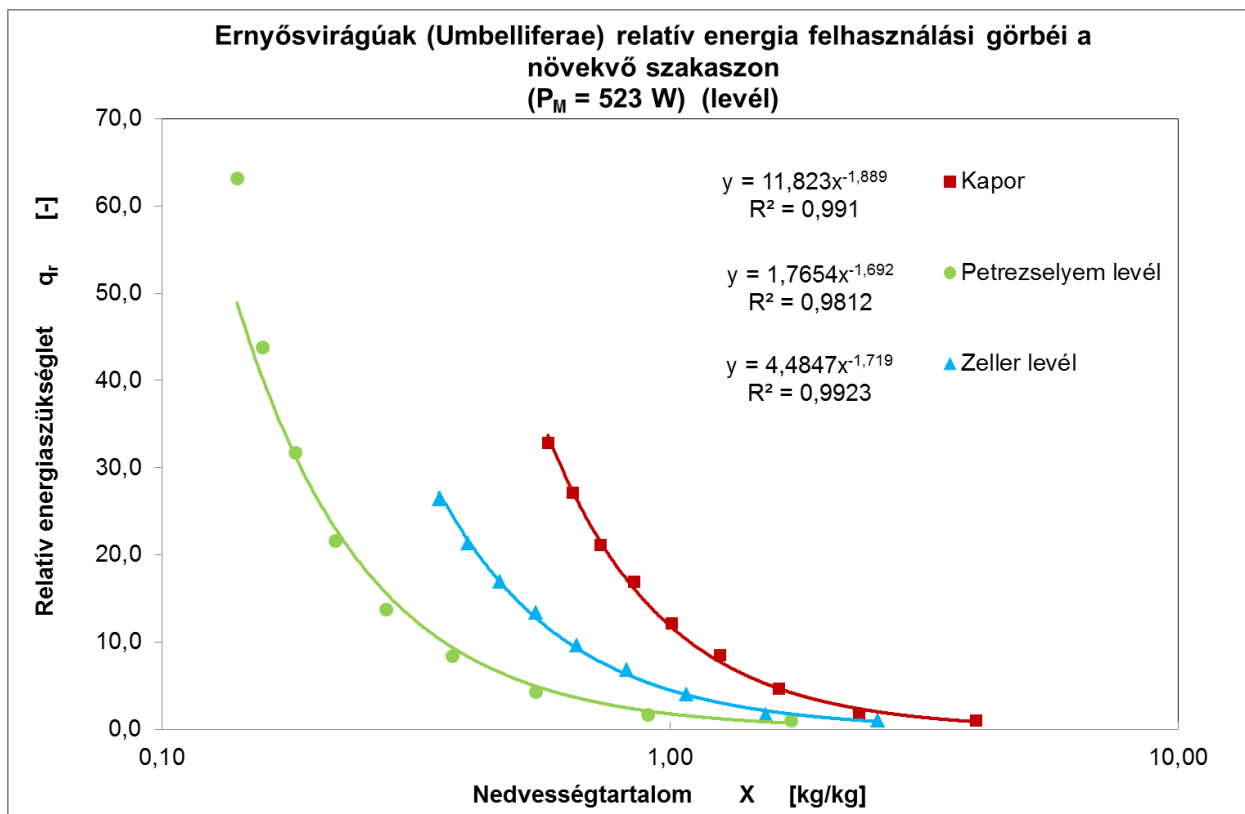
4.40. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) levélzöldségek fajlagos száradási sebesség görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (523 W)

Megszerkesztve a különböző növények relatív energiaszükséglet görbéit a száraz bázison mért nedvességtartalom függvényében (4.41. ábra), a gyökérzöldségek és burgonyafélék diagramjairól már jól ismert görbe alakot kapjuk, amelynek két jellemző szakaszát ezen az ábrán is jól el lehet különíteni. A levélzöldségek esetén is relatív energiaszükséglet a nagyobb nedvességtartalom esetén állandónak tekinthető, míg az alacsonyabb nedvességtartalom szakaszán intenzív növekedés jellemzi. Az állandó szakasz a levélzöldségek esetén rövidebb, mivel a minta tömege kisebb volt, mint a másik két növénycsoport mérései során, így a fajlagos energiaszükséglet is nagyobb értékre adódik. A kritikus pont - az előző két csoporthoz hasonlóan – alacsony kezdeti nedvességtartalom esetén alacsonyabb, míg nagyobb kezdeti nedvességtartalom esetén magasabb nedvességtartalomnál jelentkeznek. Mindezeket figyelembe véve a növekedési szakaszt mindhárom növényre a már megadott (4.2) egyenlettel lehet jellemezni (4.42. ábra). Az egyenlet együtthatóit a hozzájuk tartozó korrelációs együtthatók értékével az ábrán látható. A 3 növény összehasonlításához ebben az esetben is felhasználtam a relatív száraz bázison mért nedvességtartalmat. Az így adódó pontokat egy diagramban ábrázolva (4.43. ábra) megadható a csoportra jellemző relatív energiaszükséglet függvény, amelynek alakja megegyezik a korábban bemutatott két csoportnál használt összefüggéssel (4.3 egyenlet).

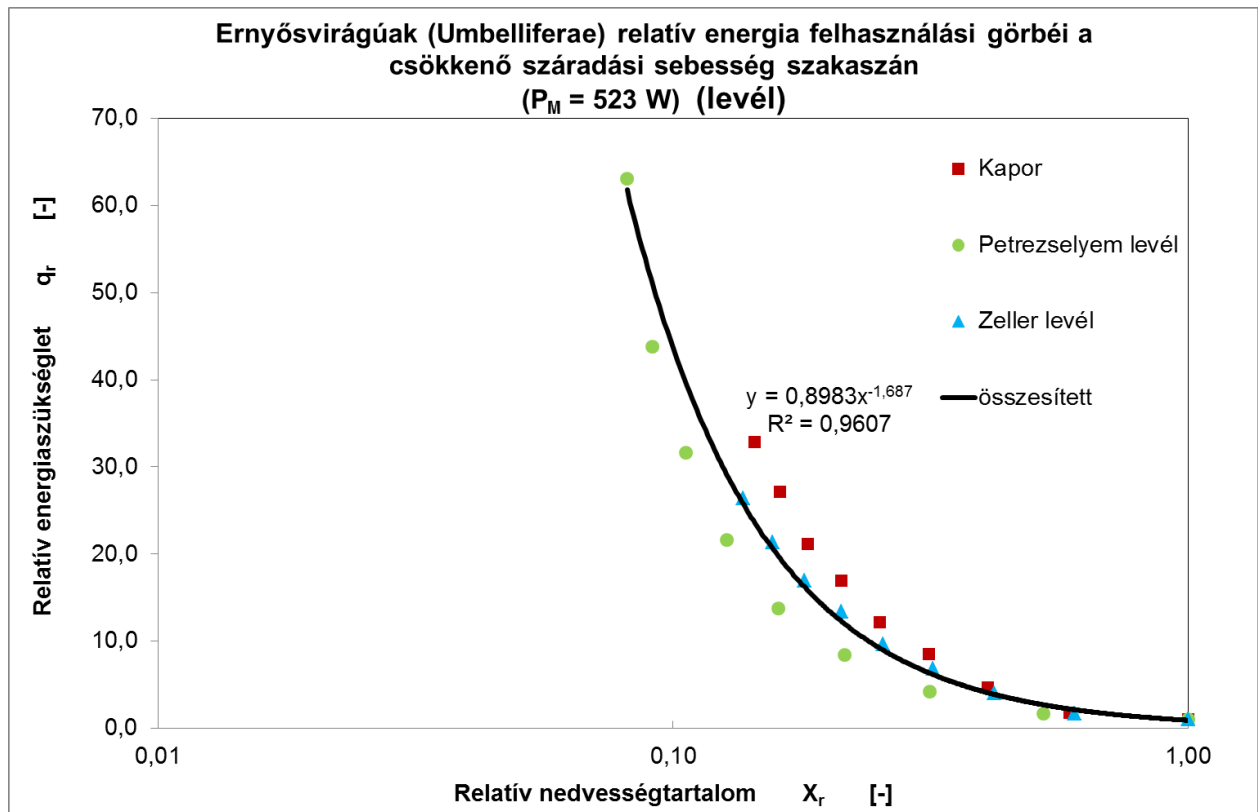
Összefoglalva a levélzöldségek méréseinek tapasztalatait elmondható, hogy bár a morfológiai felépítése ennek a növénycsoportnak jelentősen eltér a korábban vizsgált növénycsoportokétól, mégis a kapott eredmények ugyanolyan összefüggésekkel jellemezhetők. Ezek az összefüggések csupán az egyes növénycsoportokra jellemző együtthatókban térnek el egymástól.



4.41. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) levélzöltségek relatív energiaszükséglet görbéi a csökkenő száradási sebesség szakaszán (523 W)



4.42. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) levélzöltségek relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon (523 W)



4.43. ábra Az Ernyősvirágú (Umbelliferae) levélzöltségek relatív energiaszükséglet görbéi a növekvő szakaszon, a relatív nedvességtartalom függvényében (523 W)

4.5. Új tudományos eredmények

Kutatómunkám során különböző morfológiai tulajdonsággal rendelkező növénycsalád nedvességleadási jellemzőit vizsgáltam mikrohullámú energiaközlés esetén, amelynek új tudományos eredményeit a következőkben foglaltam össze.

1. Kísérletek alapján meghatároztam a csökkenő száradási sebesség szakaszára vonatkozóan a fajlagos száradási sebesség és száraz bázisra számított nedvességtartalom közötti függvénykapcsolatot. A függvény egy másodfokú polinommal jellemezhető, amelynek általános alakja:

$$S_f = a \cdot X^2 + b \cdot X + c.$$

Az egyes növénycsoportok együtthatóit az alábbi táblázatban foglaltam össze:

Magnetron teljesítmény	Növénycsoport	Az egyenlet együtthatói			R ²
		a	b	c	
456,8 W	Gyökérzöltségek	-0,0004	0,0043	-0,0012	0,8552
	Burgonyafélék	-0,0002	0,0041	-0,002	0,7456
523 W	Gyökérzöltségek	-0,0002	0,0046	-0,0016	0,9123
	Burgonyafélék	-0,00004	0,004	-0,0022	0,8152
	Levélzöltségek	0,0022	0,0023	-0,0013	0,9288
554,6 W	Gyökérzöltségek	-0,0004	0,007	-0,0026	0,8787
	Burgonyafélék	0,00008	0,0036	0,0002	0,8935

A kapcsolatot leíró egyenlet együtthatói egy-egy morfológiai csoport esetében ugyanazt az értéket veszik fel. Ezt az összefüggést meghatároztam ernyősvirágú gyökérzöldségekre, és burgonyafélékre. Ellenőrzésképpen az ernyősvirágú levélzöldségekre is meghatároztam az összefüggést, amely igazolta a megállapításokat. Az egyes csoportok közötti különbséget az együtthatók számszerű meghatározásával lehet megadni.

- Kísérletekkel bizonyítottam, hogy mikrohullámú szárítás során, a csökkenő száradási sebesség szakasza energetikai szempontból két egymástól jól elkülöníthető szakaszra oszlik. Az első szakaszra a nagyobb nedvességtartalom jellemző és a szárítás relatív energiaszükséglete állandó. A második szakaszt pedig, amelyre az alacsony nedvességtartalom jellemző, egy progresszív függvény jellemzi. Ezt az energia szükségletre jellemző két szakaszt mindhárom vizsgált – morfológiai felépítésében egymástól jelentősen eltérő - növénycsoportnál kimutattam.
- Kísérletekkel igazoltam, hogy a két energetikai szakaszt elválasztó, kritikus pontjának helyét az alkalmazott mikrohullámú teljesítmény szint és a növénycsoport morfológiai felépítése együttesen határozza meg. Egy-egy morfológiai csoporton belül az alkalmazott teljesítményszint növekedésével, a kritikus pont helyzete a nagyobb nedvességtartalom irányába tolódik el.
- Függvénykapcsolatot határoztam meg a relatív energia szükséglet és a relatív száraz bázison mért nedvesség tartalom között, a kritikus pontot követő növekvő energiaszükséglet szakaszára, amelynek általános alakja:

$$q_r = a \cdot X_r^b.$$

A kidolgozott függvény együtthatóit minden vizsgált növényre és növénycsoportra meghatároztam. Mivel a növények morfológiai felépítése meghatározza az energiaszükséglet nagyságát, az egyenlet együtthatóinak megadásával az egymástól eltérő morfológiai csoportok energiafelhasználása megadható. Az egyes növénycsoportok együtthatóit az alábbi táblázatban foglaltam össze:

Magnetron teljesítmény	Növénycsoport	Az egyenlet együtthatói		R ²
		a	b	
456,8 W	Gyökérzöldségek	0,9028	-1,44	0,9829
	Burgonyafélék	1,2098	-1,266	0,8654
523 W	Gyökérzöldségek	0,823	-1,388	0,9707
	Burgonyafélék	1,2551	-1,193	0,8742
	Levélzöldségek	0,8983	-1,687	0,9607
554,6 W	Gyökérzöldségek	0,9609	-1,208	0,9012
	Burgonyafélék	1,1252	-1,209	0,8464

- A levélzöldségek mérésével igazoltam, hogy a száradási sebesség görbék alakjára és jellegére, valamint a relatív energiaszükséglet két szakaszára vonatkozó megállapítások - beleértve a növekvő szakasz leíró egyenletének alakját is - függetlenek a mikrohullámú tér kitöltöttségétől. Annak ellenére, hogy kísérletek során a levélzöldségek térkitöltöttségi mutatója jelentősen különbözött a burgonyafélék és a gyökérzöldségek térkitöltöttségétől, a levélzöldségekre is érvényesek a másik két morfológiai csoportra tett megállapítások.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutató munkám során az egyes növénycsoportok száradási tulajdonságait vizsgáltam a mikrohullámú energiaközlés során. Sikerült alapvető összefüggéseket kimutatnom a növények morfológiai felépítése és a közölt energia hasznosulása között, amely felhasználható további kutatások során vagy ipari szárítástechnológia kidolgozására. A mérési és adatfeldolgozási folyamatokat részletesen dokumentáltam, amely alapján a kísérletek reprodukálhatók. Ezeknek a szárítási kísérleteknek a megtervezése és megvalósítása során azonban számos egyéb, további kutatást igénylő kérdés merült fel.

A szárítási kísérleteket 3 féle növénycsoportra, ezen belül 4-4 illetve 3 növényre végeztem el, de lehetőséget látok a már vizsgált csoportok további tagjainak vizsgálatára. Az így kapott eredmények lehetőséget nyújthatnak az általam meghatározott összefüggések megerősítésre. Ezen felül további növénycsoportok részletes vizsgálatát javaslom, amelyek során elsősorban további nagy kezdeti nedvességtartalommal rendelkező növények jöhetnek szóba, mint például különböző hagymafélék, gyümölcsök. Ezzel a jelenlegi kutatások eredményeit lehetne kiterjeszteni, illetve az egyes növénycsoportokra meghatározhatók lennének azok az együtthatók, amelyek a folyamatleíró egyenletekkel, az eredmények ipari célra történő hasznosítását is elősegítené.

Az új tudományos eredmények között meghatároztam a relatív energiaszükséglet növekvő szakaszára vonatkozó összefüggéseket, amelynek meghatározásához szükség volt az átmenetet jelző kritikus nedvességtartalom meghatározására. Ennek pontos megadása, főként a kisebb teljesítményszintek alkalmazása esetén igen fontos feladat. Az elvégzett vizsgálatok alapján a kritikus pont helyzetének megadása az 1 perces mintavételezési időből adódó pontossággal adható meg. Emiatt teljesítményszinteken szükségesnek látom a kritikus pont közeli szakasz részletesebb vizsgálatát, amellyel a kritikus pont közeli folyamatok pontosíthatók.

Az előzőekben említett lehetőségek széles körű kihasználására megfontolandó a kísérleti berendezés továbbfejlesztése is. Az általam alkalmazott, kifejezetten kísérleti célokra megépített berendezés több féle paraméter pontos rögzítését tette lehetővé, mint amire a háztartási mikrohullámú készülékeken végzett kísérletek esetében lehetőség volt. Ugyanakkor a kísérletek során a kezelőtér fizikai méreteiből adódóan a szárítandó anyag tömege csak kis mértékben volt változtatható, amely így meghatározta a használható mikrohullámú teljesítmény nagyságát is. A kezelőtér átalakításával ez a probléma is orvosolható lenne.

Minden növénytípus esetében fontosnak tartom a mikrohullámú szárítást követő részletes minőségi és beltartalmi érték vizsgálat elvégzését. Mivel ez a jelen vizsgálatok során nem volt szempont, így ezek nem kerültek meghatározásra, de ezeknek a jellemzőknek az ismerete alapfeltétele az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságának. Így lehetőség nyílik arra, hogy a mikrohullámú szárítás az energetikai és minőségi szempontok szerint optimális mértékig legyen felhasználható. Ismerve a mikrohullámú szárítás felhasználásának határait, könnyen létrehozható, más típusú – pl. konvektív – szárítási módokkal összevonva a folyamatot, egy olyan kombinált szárítási eljárást, amely minden szempontból a legkedvezőbb eredmény hozza.

A vizsgálatok során kapott adatok felhasználhatók egy egységes adatbázis elkészítésére a fontosabb mezőgazdasági terményekre vonatkozóan, amely segítségével különböző kezdeti peremfeltételek esetén az egyes anyagok vízleadási folyamatai előre meghatározhatók, illetve ennek részeként, anyagminőségi kritériumok meghatározása a megfelelő paraméterek, és ezek összefüggéseinek megállapítására.

Emellett ez az adatbázis alkalmas lehet az energia- és anyagtranszport folyamatok leírására, illetve jellemzőinek meghatározására a mikrohullámú szárítás során, amelynek segítségével olyan folyamatleíró matematikai modell alkotható meg, amelyben az egyes növények szárítási folyamatát befolyásoló paraméterek szerepe egyértelműen meghatározható.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

BIOLÓGIAI ANYAGOK VÍZLEADÁSI TULAJDONSÁGAI MIKROHULLÁMÚ TÉRBEN

A mikrohullámú szárítási folyamatok egyik legfontosabb jellemzője az energiaközlés hatékonysága. Mivel ennek nagysága nagymértékben függ a szárítandó anyag száradási tulajdonságaitól, ezért részletes vizsgálatokra van szükség, amelyek feltárják az összefüggéseket az energiaközlés formája és az adott anyag szerkezeti felépítése között.

Disszertációmban a mezőgazdasági termények közül olyan növénycsoportokat vizsgáltam, amelyek magas kezdeti nedvességtartalommal rendelkeznek, de morfológiai felépítésükben jelentősen eltérnek egymástól. Céлом volt, hogy olyan összefüggéseket határozzak meg a mikrohullámú energiaközlés és a szárított növények kapcsolatára, amelyek nem csak az egyes növények tulajdonságait írják le, de kellő pontossággal jellemzik a teljes növénycsoportot is.

A kitűzött célok megvalósításához szakirodalmi kutatást végeztem, amely alapján meghatároztam a szárítási folyamatok fontosabb tulajdonságait külön tárgyalva a mikrohullámú szárítás során felmerülő problémákat, illetve az energiaközlés formájából adódó sajátosságokat.

A próbamérések alapján kísérletsorozatot állítottam össze, amelyek során összességében 11 növény egyedi tulajdonságait vizsgáltam, amihez 3 féle teljesítményszint beállítást alkalmaztam. A kísérletek részletes leírása, beleértve a mérések során alkalmazott mérőberendezés és a mérőműszerek ismertetését, az anyag és módszer fejezetben kerültek ismertetésre.

Az eredmények fejezetben bemutattam az egyes kísérletek eredményeit növényekre és növénycsoportokra vonatkoztatva. A kiértékelést diagramok formájában mutattam be, amelyek alapján megállapításokat tettem, amelyek az egyes növények mellett a növénycsoportra is érvényesek voltak.

Az elvégzett kísérletek eredményeinek kiértékelésével a következő új tudományos eredményeket értem el a mezőgazdasági termények mikrohullámú szárítási folyamataira vonatkozólag:

Meghatároztam az összefüggést a csökkenő száradási sebesség szakaszán az egyes növények és növénycsoportok fajlagos száradási sebessége és a száraz bázison számított nedvességtartalma között, amelynek formája minden esetben azonos volt, mindössze az együtthatók különböztek egymástól.

Bizonyítottam, hogy a relatív energiateljesítmény a csökkenő száradási sebesség szakaszán nedvességtartalomtól függően egy állandó és egy intenzíven növekedő szakaszra osztható, amelyek egymástól jól elkülöníthetőek.

A kísérleti eredmények alapján kimutattam, hogy a két szakaszt elválasztó kritikus pont helyzetét az alkalmazott teljesítmény és a növény morfológiai kialakítása együttesen befolyásolja.

Összefüggést határoztam meg a relatív energiaszükséglet növekedési szakaszának leírására, amelyhez a szükséges együtthatókat is meghatároztam minden egyes növényre és növénycsoportra.

Végül a levélzöldségeken végzett ellenőrző mérésekkel igazoltam, hogy a kapott eredmények nem függenek a mikrohullámú mintatér kitöltöttségétől.

A kutatási folyamat során felmerült észrevételeimet és megjegyzéseimet is ismertettem, amelyek a kutatás folytatásának lehetséges irányára, és az eredmények gyakorlati hasznosítására adnak javaslatot.

A kísérletek során kapott eredmények és az azok alapján meghatározott új tudományos eredmények alkalmasak a mikrohullámú szárítási folyamatok pontosabb leírására, emellett megfelelő alapot képeznek a terület további kutatásához.

7. SUMMARY

DEWATERING PROPERTIES OF BIOLOGICAL MATERIALS DURING MICROWAVE TREATMENT

Efficiency of energy transfer is one of the most important parameters in microwave drying processes. Since it largely depends on the drying properties of the material, detailed studies are required. These studies can explore the relationships between the form of energy transfer and the structure of the studied material.

In my dissertation I investigated such plant groups from agricultural products, which have high initial moisture content, but their morphological structures are noticeably different. My aim was to determine the relationships between the microwave energy transfer and the products to be dried that not only describe the properties of the plants, but also characterize the groups of plants with sufficient accuracy.

To fulfill these objectives, I carried out literature research, based on which I determined the main properties of the drying processes, discussing the problems in the microwave drying processes and the characteristics of energy transfer separately.

Based on trial measurements, I compiled a series of experiments, in which the unique properties of 11 plants in total were studied, using three power-level settings were used. Details of the experiments, including descriptions of the measuring equipment and instruments were presented in the chapter of materials and methods.

In the chapter of results, I evaluated the results obtained from experiments with individual plants and plant groups. The results were presented using different charts, and based on those, I draw conclusions which are valid to the individual plants and plant groups.

By evaluating the results of the experiments, I obtained the following new scientific results about microwave drying processes of agricultural products:

In the falling drying rate period, I determined the relationship between the specific drying rate of individual plants and plant groups and their moisture content. The formula for the relationship was same in each case, they only differed in the values of coefficients.

I proved that in the period of falling drying rate, the relative energy consumption, which depends on the moisture content, could be divided into a constant and an intensively increasing period, which can be well separated from each other.

Based on the results, I demonstrated that the position of critical point separating the two-phases is influenced by both the level of applied power and the morphological structure of the plant.

I determined the correlation describing the increasing phase of the relative energy consumption and its necessary coefficients for each plants and plant groups.

Finally, I proved by control measurements on leaf vegetables that the results do not depend on the fullness of the sample space of the microwave field.

I expounded my observations and comments that raised during the research process. These comments suggest a possible direction for further research and for the practical applications of the results.

The obtained new scientific observations based on the described experiments accurately describe the microwave drying process and form an appropriate basis for further research on this field.

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

1. ALMÁSSY GY. (1973): Mikrohullámú kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
2. ARBALLO J. R., CAMPAÑONE L. A., MASCHERONI R. H. (2010): Modeling of microwave drying of fruits. *Drying Technology*, Vol. 28 (10), pp. 1178-1184.
3. AYAPPA K.G. (1997): Modeling transport processes during microwave heating: A review. *Reviews in chemical engineering*. Vol 13 (2) pp. 1-69.
4. BABBITT J.D. (1949): Observations on the adsorption of water vapour by wheat. *Canadian Journal of Research*, Vol. 27 (F), pp. 55-72.
5. BAKKER-ARKEMA F.W., HALL C.W. (1965): Static versus dynamic moisture equilibrium in the drying of biological products. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 10 (4), pp. 308-311.
6. BALL M. D., LORENSEN C. P., HEWITT B. C., LACROIX C. M., KEEFER R. M. (1993): Characterization of non-uniform heating and its impact on food quality. *Proceedings of 28th Microwave Symposium: Quality Enhancement Using Microwaves*, Montreal, Canada, pp. 246-253.
7. BARÁTH CS., ITTCZÉS A., UGRÓSDY GY. (1996): *Biometria*. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 59-60. o.
8. BECKER H.A., SALLANS H.R. (1956): A study of the Desorption isotherms of wheat at 25 °C and 50 °C. *Cereal Chemistry*, Vol. 33 (2), pp. 79-90.
9. BEKE J. (1997): Terményszárítás. *Agroinform Kiadóház*. Budapest, 15-25. o.
10. BEKE J., MUJUMDAR A.S. (1993): Influence of Drying Conditions on the Fragility of Corn Kernels. *Drying Technology*, Vol. 11. (3) pp. 603-614.
11. BEKE J.-BOSISIO R.G.-MUJUMDAR A.S. (1993): Equipment and method for microwave drying experiments. *Conference of Agricultural Engineering Comity of Hungarian Academy Of Science*, Gödöllő, Hungary
12. BOSISIO R. G. (1985): Electromagnetic surface wave on metallic structures. 2nd International Conference on Surface Waves in Plasmas and Solids. UCSW-85. Ohrid, Yugoslavia,
13. BROKKER D. B., BAKKER-ARKEMA F.W., HALL C.W. (1974): Drying cereal grains. The AVI Publ. Co. Inc.
14. BRUNAUER S, DEMING L.S., DEMING W.G.; TELLER E. (1940): On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of American Chemistry Society*, Vol. 62 (7), pp. 1723–1732.

15. BRUNAUER S., EMMETT P.H., TELLER E. (1938): Adsorption of gases in multi-molecular layers. *Journal of American Chemistry Society*, Vol. 60, pp. 309-319.
16. CHEN C.S., CLAYTON J.T. (1971): The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. *Transaction of ASAE*, Vol. 14 (5), pp. 927-929.
17. CHUNG D. S., PFOST H.B. (1967): Adsorption and Desorption of water vapour by cereal grains and their products. *Transaction of ASAE*, Vol. 10 (4), pp. 549-557.
18. COHAN L.H. (1938): Sorption hysteresis and the vapour pressure of concave surfaces. *Journal of American Chemistry Society*, Vol. 60 (2), pp. 433-435.
19. DAY D. L., NELSON G.L. (1965): Desorption isotherms for wheat. *Transaction of ASAE*, Vol. 8 (2), pp. 293-297.
20. DUTTA B., RAGHAVAN G. S. V., DEV S. R. S., LIPLAP P., MURUGESAN R., ANEKELLA K., KAUSHAL T. (2012): A comparative study on the effects of microwave and high electric field pretreatments on drying kinetics and quality of mushrooms. *Drying Technology*, Vol. 30 (8), pp. 891-897.
21. FUMAGALLI F., SILVEIRA A. M. (2005): Quality evaluation of microwave-dried packham's triumph pear. *Drying Technology*, Vol. 23 (9-11), pp. 2215-2226.
22. GINZBURG A. S. (1976): *Élelmiszerek szárításelméletének és technikájának alapjai*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 204-232. o.
23. GIRI S. K., PRASAD S. (2007): Optimization of microwave-vacuum drying of button mushrooms using response-surface methodology. *Drying Technology*, Vol. 25 (5), pp. 901-911.
24. GUNASEKARAN S. (1999): Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technology*, Vol. 17 (3), pp. 395-412.
25. HALL C. W. (1963): Preliminary investigation of shelled corn drying with high-frequency energy. *Agricultural Engineering* Vol. 44.
26. HARKINS W. D., JURA G. (1944): A vapour adsorption method for the determination of the area of a solid. *Journal of American Chemistry Society*, Vol. 66 (8), pp. 1366-1371.
27. HENDERSON S. M. (1952): A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, Vol. 33, pp. 20-32
28. HOLTZ E., AHRNE L., RITTENAUER M., RASMUSON A. (2010): Influence of dielectric and sorption properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials, *Journal of Food Engineering*, Vol. 97, pp. 144-153.
29. IMRE L. (szerk.) (1974): *Szárítási kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest,
30. JUDÁK E., BEKE J. (1994): Nedvesség mérés mikrohullámú térben. *Élelmiszerfizikai Közlemények*. 58. (1) 61-71. o.

31. KUDRA T., A. S. Mujumdar (2009): Advanced drying technologies. 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
32. LANGMUIR J. J. (1918): Grain drying methods. Journal of American Chemistry Society, Vol 40 (9), 1361-1366.
33. LEWIS W. K. (1921): The rate of drying of solid materials. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 13, pp. 427-432.
34. LI Z. Y., WANG R. F., KUDRA T. (2011): Uniformity issue in microwave drying. Drying Technology, Vol. 29 (6), pp. 652-660.
35. LIAN G., HARRIS C. S., EVANS R. WARBOYS M. (1997): Coupled heat and moisture transfer during microwave vacuum drying. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, Vol. 32 (4), pp. 34-44.
36. LUDÁNYI L. (2004): A mikrohullámú üregrezonátor, mint a korszerű szárítástechnika munkatere Doktori értekezés, SZIE Gödöllő
37. MUJUMDAR A. S. (2007): Handbook of industrial drying. 3rd edition, CRC Press, Boca Raton, USA
38. NAHIMANA H., ZHANG M. (2011): Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot, Drying Technology, Vol. 29 (7), pp. 836-847.
39. NELSON S. O. (1965): Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50 MHz range. Transactions of the ASAE, Vol. 8, pp. 398-405.
40. NELSON S. O. (1987): Models for the dielectric constants of cereal grains and soybeans. Journal of. Microwave Power Vol. 22 (1), pp. 35-39.
41. NGODDY P. O., BAKKER-ARKEMA F. W. (1970): A generalized theory of sorption phenomena in biological materials. I. The isotherm equation. Transactions of the ASAE, Vol. 13 (5), pp. 612-617.
42. NGODDY P. O., BAKKER-ARKEMA F. W. (1972a): A generalized theory of sorption phenomena in biological materials. II. Adsorption compression on sorbing biological materials (a density function for sorbed water). Transactions of the ASAE, 15 (6), pp. 1153-1159.
43. NGODDY P. O., BAKKER-ARKEMA F. W. (1972b): A generalized theory of sorption phenomena in biological materials. III.A pore size distribution function of the power law type for biological materials. Transactions of the ASAE, Vol. 15 (6), pp. 1160-1164.
44. NGODDY P. O., BAKKER-ARKEMA F. W. (1972c): A generalized theory of sorption phenomena in biological materials. IV. Sorption hysteresis. Transactions of the ASAE, Vol. 15 (6), pp. 1165-1169.
45. PAGE G.E. (1949): Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette,

46. PICHLER H. J. (1956): Sorption isotherms for grain and rape, *Landtechnik Forschrift*, Vol. 6 (2), pp. 47-52.
47. RODRÍGUEZ R., LOMBRAÑA J. I., KAMEL M., DE ELVIRA C. (2005): Kinetic and quality study of mushroom drying under microwave and vacuum. *Drying Technology*, Vol. 23 (9-11), pp. 2197-2213.
48. SALEK J. (1986): Heat and mass transfer studies in fluidised beds combined with microwaves for the dehydration of food materials. Ph.D thesis. University of Alabama at Urbana-Champaign, USA.
49. SANGA E. C. M., MUJUMDAR A. S., RAGHAVAN G. S. V. (2000): Microwave drying: principles and applications. *Developments in drying (I): food dehydration*. Mujumdar, A. S. and S. Suvachittanont ed., Kasetsart University Press, Bangkok, Thailand, pp. 112-141.
50. SEMBERY P. (1979): *Mezőgazdasági szemes és szálás anyagok dielektromos jellemzői*. Akadémia Kiadó. Budapest
51. SIMMONDS W. H. C., WARD G. T., MCEWEN E. (1953): The drying of wheat grain – I. mechanisms of wheat drying. – II. Through drying of deep beds. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 31. (3), pp. 265-288.
52. SINGH A, NAIR G. R., RAHIMI J., GARIEPY Y., RAGHAVAN G. S. V. (2013): Effect of static high electric field pre-treatment on microwave-assisted drying of potato slices. *Drying Technology* Vol. 31 (16), pp. 1960-1968.
53. SITKEI GY. (1981): *Mezőgazdasági anyagok mechanikája*. Akadémiai Kiadó, Budapest
54. SMITH S. E. (1947): The sorption of water vapour by high polymers. *Journal of American Chemistry Society*, Vol. 69 (3), pp. 646-651.
55. SONG X., ZHANG M., MUJUMDAR A. S., FAN L. (2009): Drying characteristics and kinetics of vacuum microwave-dried potato slices. *Drying Technology*, Vol 27 (9), pp. 969-974.
56. STROHMAN R. D., YOERGER R. R. (1967): A new equilibrium moisture content equation. *Transactions of the ASAE*, Vol. 10 (5), pp. 675-677.
57. THOMSON W. (Lord Kelvin) (1871): On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid, *Philosophical Magazine*, series 4, 42 (282), pp 448-452.
58. TURCSÁNYI G. (SZERK.) (1995): *Mezőgazdasági növénytan*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 303-329. o.
59. TURNER I. W., JOLLY P. G. (1991): Combined microwave and convective drying of a wet porous material. *Drying Technology*, Vol. 9 (5), pp. 1209-1269.
60. VOSS W. A. G. (1969): Microwave instruments for material control. *Journal of Microwave Power*, Vol 4 (3), pp. 200-215.

61. WANG S., Hu Z., HAN Y., GU Z. (2013): Effects of magnetron arrangement and power combination of microwave on drying uniformity of carrot. *Drying Technology* Vol. 31 (11), pp. 1206-1211.
62. WU G. C., ZHANG M., MUJUMDAR A. S., WANG R. (2010): Effect of calcium ion and microwave power on structural and quality changes in drying of apple slices. *Drying Technology*, Vol. 28 (4), pp. 517-522.
63. XU D., GUANG Y. R., WEN X. Z. (2012): Microwave freeze drying of apple slices based on the dielectric properties. *Drying Technology*, Vol. 30 (5), pp. 535-541.
64. YOUNG H. H., NELSON G. L. (1967): Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials, *Transactions of the ASAE*, Vol. 10 (2), pp. 260-263.
65. ZHANG D., MUJUMDAR A. S. (1992): Deformation and stress analysis of porous capillary bodies during intermittent volumetric thermal drying. *Drying Technology*, Vol 10 (2), pp.421-444.
66. ZHANG M., JIANG H., LIM R. X. (2010): Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products—drying kinetics and quality considerations. *Drying Technology*, Vol. 28 (11), pp. 1307-1316.

M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk*Lektorált cikk idegen nyelven*

1. Beke J., Bihercz G., **Kurják Z.** (2005): Study on temperature and moisture distribution inside the batch of convective corncob dryer. Hungarian Agricultural Engineering, 18 (5), pp. 78-79, (HU ISSN 0864-7410)
2. Beke J., Bihercz G., **Kurják Z.** (2007): Simulation of drying process of corn kernels during microwave and convective treatment, Asia Pacific Journal of Chemical Engineering, 2007. (2), pp. 75-82.
3. Beke J., **Kurják Z.** (2008): Improvement of maize seed drying process by using semi-empirical model and special thermal analysis. Mechanical Engineering Letters, Vol. 1., pp. 43-53, (HU ISSN 2060-3789)
4. Beke J., **Kurják Z.** (2008): Reducing the energy consumption of seed-corn cob drying by means of a thermal analysis method., Journal of Turkish Agricultural Engineering Association, 2008 (3), pp. 135-142.
5. Beke J., **Kurják Z.** (2010): Development of vegetable drying process by combining convective and microwave methods. Mechanical Engineering Letters, Vol. 4. pp. 50-64, (HU ISSN 2060-3789)
6. Beke J., **Kurják Z.**, Bessenyei K. (2011): Analysing the microwave drying process of potato, apple and onion samples from energetic point of view. Mechanical Engineering Letters, Vol. 6. pp. 59-73, (HU ISSN 2060-3789)
7. **Kurják Z.**, Barhács A., Beke J. (2012): Energetic analysis of drying biological materials with high moisture content by using microwave energy. Drying Technology, Volume 30, Issue 3, pp. 312-319. (ISSN 0737-3937 Print; 1532-2300 Online) (IF: 1.814)
8. Beke J., **Kurják Z.**, Bessenyei K. (2014): Enhanced drying due to nonthermal effects from microwave irradiation. Drying Technology, Volume 32, Issue 11, pp. 1269-1276, (ISSN 0737-3937 Print, 1532-2300 Online) (IF: 1.518)

Lektorált cikk magyar nyelven

1. Bihercz G., **Kurják Z.** (2003): Sárgarépa- és paradicsomminták konvektív és mikrohullámú szárítási folyamatainak összehasonlítása. Mezőgazdasági technika, 2003. augusztus, 2-5. o.
2. Beke J., Bihercz G., **Kurják Z.** (2008): Hibridkukorica-szárítás technológia hőtechnikai elemzése. Mezőgazdasági technika, 2008. július, 2-5. o.
3. Beke J., **Kurják Z.**, Bessenyei K. (2012): Konvekciós szárítási modellek alkalmazási lehetőségei a mikrohullámú szárítási folyamatokban. Mezőgazdasági technika, 2012. július, 30-32. o.
4. **Kurják Z.**; Bessenyei K. (2014): Morfológiai hatások a száradási folyamatban konvektív és mikrohullámú energiaközlés esetén. Mezőgazdasági technika, 2014. június, 2-5. o.

Nemzetközi konferencia kiadvány

1. Beke J., **Kurják Z.**, Bihercz G. (2002): Microwave field test of inner moisture and temperature conditions of beetroot, Drying 2002 – Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS 2002), Beijing, China, Vol. B., pp. 891-901.
2. Bihercz G., Beke J., **Kurják Z.** (2003): Experimental analysis of drying process of carrot and tomato samples. Proceedings of the 2nd Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Ravenna, Italy, pp. 99-100, (ISBN 88-901080-0-2-44406)
3. Bihercz G., **Kurják Z.** (2003): Comparison of convective and microwave drying process of tomato and carrot samples. Proceedings of the Symposium EUDrying '03, Heraklion, Crete, pp. 268-277.
4. Bihercz G., **Kurják Z.** (2004): A new designed convective model deep bed grain dryer for drying grained materials. Proceedings of the 3rd Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Poretta Terme, Italy, pp. 93-94, (ISBN 88-901080-0-2-44406)
5. Bihercz G., **Kurják Z.** (2004): Analysis of the microwave and convective vegetable dewatering process as a function of drying conditions, Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), Sao Paulo, Brazil, Vol. C. pp. 1652-1659, (ISBN 85-904573-1-1)
6. Bihercz G., **Kurják Z.** (2005): Laboratory-scale calibration of a self-made model deep bed grain dryer for corn kernels. Proceedings of the 4th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Castrocaro Terme, Italy; pp. 153-154, (ISBN 88-901080-2-9-44406)
7. Bihercz G., Beke J., **Kurják Z.** (2006): A new approach for simulation of drying process of corn kernels and corncob in extended layer height. Drying 2006 – Proceedings of the 15th International Drying Symposium (IDS 2006), Vol. C., Budapest, Hungary, pp. 1381-1387, (ISBN 963 9483 58 3)
8. Beke J., **Kurják Z.** (2008): Development of seed-corn cob drying technology by using special thermal analysis method, Drying 2008 - Proceedings of the 16th International Drying Symposium (IDS 2008), Vol. B., Hyderabad, India, pp. 936-941, (ISBN 978 81 907371 1 1)
9. Beke J., **Kurják Z.** (2009): Energy-optimizing process analysis for technological development of greens and vegetable drying. Proceedings of the XII Polish Drying Symposium, Lodz, Poland, pp. 312-326.

Magyar nyelvű konferencia kiadvány

1. Bihercz G., Beke J., **Kurják Z.** (2003): Leveles zöldségek konvektív szárítása. MTA-MÉM Kutatási és fejlesztési tanácskozás kiadványa, Nr. 27. (3), Gödöllő 37-40. o.
2. **Kurják Z.**, Beke J., Bihercz G. (2003): Egyes zöldségfélék száradási tulajdonságainak vizsgálata mikrohullámú térben. MTA-MÉM Kutatási és fejlesztési tanácskozás kiadványa, Nr. 27. (3), Gödöllő, 41-45. o.
3. Bihercz G., **Kurják Z.** (2003): Egyes eltérő fizikai tulajdonságú zöldségfélék száradási jellemzőinek vizsgálata. 5. Magyar Szárítási Symposium Proceedings Kiadványa Szeged, 7-14. o.

Nemzetközi konferencia abstract:

1. Bihercz G., Beke J., **Kurják Z.** (2002): Computer aided simulation of thin layer and deep bed grain drying processes – preliminary resource results. International Conference on Agricultural Engineering - 2002, Abstract, Part1, pp. 183-184.
2. Bihercz G., **Kurják Z.** (2004): Comparative analysis on measured data of some vegetable type under microwave and convective treatments. 6th International Conference on Food Science – Summaries of Lectures and Posters, Szeged, pp. 108-109.
3. Beke J., **Kurják Z.** (2008): Reducing the energy consumption of seed-corn cob drying by means of a thermal analysis method. Proceedings of 10th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture. Antalya, Turkey, p. 54, (ISBN978-975-7666-93-6)
4. Beke J., **Kurják Z.**, Bessenyei K. (2011): A possible method to modelling the microwave crop drying. Proceedings of the Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry 2nd International Conference in Agricultural Engineering, Gödöllő, Hungary, p. 111, (ISBN 978-963-269-249-4)

Magyar nyelvű abstract:

1. Beke J., **Kurják Z.** (2001): Energia- és anyagátviteli tapasztalatok egyes gyökér és gumós növények mikrohullámú szárításakor. 4. Magyar Szárítási Symposium Kiadványa, Mosonmagyaróvár, 22. o.
2. Beke J., **Kurják Z.** (2001): Sárgarépa- és burgonyaszárítási kísérletek mikrohullámú térben. MTA-MÉM Kutatási és fejlesztési tanácskozás kiadványa Nr. 25. Gödöllő, 43. o.
3. Beke J., Bihercz G., **Kurják Z.** (2004): Petrezselyemzöld száradásának összehasonlító vizsgálata. MTA-MÉM Kutatási és fejlesztési tanácskozás kiadványa, Nr. 28. Gödöllő, 12. o.
4. **Kurják Z.**, Beke J., Bihercz G; (2007): Hibrid kukoricaszárítás technológia hőtechnikai elemzése. 6. Magyar Szárítási Symposium Kiadványa, Nyíregyháza, 24-25. o. (ISBN 978-963-7336-79-9 CD melléklet)
5. **Kurják Z.**, Beke J., Bihercz G. (2007): Szimulációs modell a konvektív és mikrohullámú szárítás összehasonlítására az energiafelhasználás alapján. 6. Magyar Szárítási Symposium Proceedings Kiadványa, Nyíregyháza, 130-131. o. (ISBN 978-963-7336-79-9 CD melléklet)
6. **Kurják Z.**, Beke J. (2007): Eltérő fizikai tulajdonságú zöldségfélék száradási jellemzőinek vizsgálata mikrohullámú és konvektív hőközléssel. Lippay János – Ormos Imre – Vas Károly Tudományos Ülésszak Kiadványa, Budapest, 50-51. o. (ISBN 978-963-06-3350-5)
7. **Kurják Z.**, Barhács A., Beke J. (2011): Biológiai anyagok szárításának fontosabb energetikai szempontjai. 7. Magyar Szárítási Symposium Kiadványa, Gödöllő, 26-27. o. (ISBN 978-963-269-212-8)

Hivatkozások

Kurják Z., Barhács A., Beke J. (2012): Energetic analysis of drying biological materials with high moisture content by using microwave energy. *Drying Technology*, Vol. 30 (3), pp. 312-319. (ISSN 0737-3937 Print; 1532-2300 Online). (IF: 1.814)

1. *Cretescu I., Caprita R., Ropciuc S. (2015): Impact of microwaves on the physico-chemical characteristics of cow milk. Romanian reports in physics. Vol. 67 (2), pp. 423-430.*
2. *Bennamoun L., Chen Z., Salema A. A. (2015): Moisture diffusivity during microwave drying of wastewater sewage sludge. Transactions of the ASABE Vol. 58 (2), pp. 501-508.*
3. *Witkiewicz K., Nastaj J. (2014): Modeling of microwave-assisted regeneration of selected adsorbents loaded with water or toluene. Drying Technology, Vol. 32 (11), pp. 1369-1385.*
4. *Gécsi G., Korzenszky P., Horváth M. (2013): Comparison of traditional and microwave pasteurization of cow milk. Magyar Állatorvosok Lapja, Vol. 135 (9), 557-564. o.*
5. *Rosa G. S., Marsaioli A., Rocha S., Cristina S. (2013): Energy analysis of polyhydroxybutyrate (phb) drying using a combined microwave/rotating pulsed fluidized bed (mw/rpfb) dryer. Drying Technology Vol. 31 (7), pp. 795-801.*
6. *Ito S., Huang H., Watanabe F. (2012): Heat transfer during microwave-assisted desorption of water vapor from zeolite packed bed. Drying Technology Vol. 30 (15), pp. 1707-1713.*

M3: Mérési adatok*M3.1. A paszternák mérés részletes eredményei*

8.1. táblázat A paszternák tömegvesztési és nedves bázison számított nedvességtartalom adatai a $P_M = 456,8$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Tömegvesztés [g]					Nedvességtartalom (nedves bázis) w [%]					
	A mérés száma					A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0	0	0	0	0	82,14	81,35	81,25	81,01	81,01	81,35
1	0,32	0,32	0,36	0,30	0,31	82,07	81,28	81,17	80,94	80,94	81,28
2	1,06	0,95	1,13	0,87	0,87	81,90	81,13	80,98	80,80	80,80	81,12
3	2,27	1,91	2,30	1,69	1,68	81,62	80,89	80,69	80,60	80,61	80,88
4	3,94	3,24	3,78	2,86	2,73	81,21	80,56	80,32	80,31	80,34	80,55
5	5,95	4,74	5,64	4,15	4,00	80,70	80,18	79,83	79,97	80,01	80,14
6	8,40	6,56	7,71	5,69	5,47	80,04	79,68	79,25	79,56	79,62	79,63
7	11,43	8,76	10,13	7,49	7,21	79,16	79,06	78,53	79,05	79,13	78,99
8	14,63	11,26	12,84	9,57	9,14	78,14	78,30	77,67	78,43	78,56	78,22
9	18,26	14,15	15,84	11,93	11,47	76,85	77,34	76,62	77,68	77,83	77,27
10	21,97	17,41	19,23	14,78	14,08	75,37	76,16	75,32	76,71	76,96	76,10
11	25,89	20,93	22,67	18,29	16,87	73,59	74,74	73,84	75,38	75,94	74,70
12	30,36	24,78	26,66	21,97	19,94	71,21	72,98	71,88	73,82	74,71	72,92
13	34,79	28,96	30,82	25,96	23,15	68,39	70,77	69,50	71,89	73,28	70,77
14	38,82	33,63	34,78	30,28	26,93	65,30	67,82	66,83	69,45	71,38	68,16
15	42,60	37,89	38,45	34,46	30,92	61,79	64,57	63,90	66,64	69,05	65,19
16	46,16	41,79	42,23	38,46	34,96	57,77	60,95	60,29	63,43	66,27	61,74
17	50,13	45,53	45,83	42,44	39,01	52,16	56,72	56,10	59,56	62,94	57,50
18	53,89	49,65	49,78	46,54	42,89	45,27	50,84	50,36	54,60	59,07	52,03
19	56,74	53,35	53,63	50,68	46,65	38,56	44,02	43,12	48,19	54,45	45,67
20	58,63	55,86	56,34	53,83	50,89	33,13	38,19	36,60	41,96	47,82	39,54
21	59,91	57,83	58,15	56,22	53,93	28,87	32,70	31,35	36,12	41,73	34,16
22	60,94	59,30	59,58	57,97	56,25	25,03	27,92	26,54	31,05	36,04	29,32
23	61,72	60,39	60,60	59,24	57,81	21,83	23,92	22,68	26,83	31,55	25,36
24	62,27	61,17	61,38	60,28	58,99	19,40	20,76	19,44	22,97	27,70	22,06
25	62,75	61,80	61,89	61,08	59,95	17,16	18,02	17,17	19,71	24,24	19,26
26	63,12	62,28	62,36	61,72	60,67	15,34	15,80	14,97	16,90	21,42	16,89
27	63,41	62,66	62,71	62,23	61,23	13,86	13,96	13,24	14,52	19,07	14,93
28	63,67	62,93	63,01	62,60	61,65	12,49	12,60	11,71	12,70	17,22	13,34
29	63,86	63,19	63,24	62,94	62,04	11,46	11,24	10,50	10,96	15,42	11,92
30	64,01	63,45	63,42	63,23	62,42	10,63	9,85	9,53	9,42	13,59	10,61
31	64,15	63,64	63,57	63,46	62,68	9,84	8,80	8,70	8,16	12,30	9,56
32	64,28	63,80	63,72	63,65	62,87	9,10	7,90	7,86	7,09	11,33	8,66

8.2. táblázat A paszternák száraz bázison számított nedvességtartalom és nedvességviszony adatai a $P_M = 456,8$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Nedvességtartalom (száraz bázis) X [kg/kg]						Nedvességviszony Y [-]						
	A mérés száma						A mérés száma						szórás s
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	
0	4,60	4,36	4,33	4,27	4,27	4,37	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,000	0,0000
1	4,58	4,34	4,31	4,25	4,25	4,34	0,995	0,995	0,994	0,995	0,995	0,995	0,0003
2	4,52	4,30	4,26	4,21	4,21	4,30	0,984	0,985	0,983	0,987	0,987	0,985	0,0017
3	4,44	4,23	4,18	4,16	4,16	4,23	0,965	0,971	0,965	0,974	0,974	0,970	0,0045
4	4,32	4,14	4,08	4,08	4,09	4,14	0,940	0,950	0,942	0,956	0,958	0,949	0,0080
5	4,18	4,04	3,96	3,99	4,00	4,04	0,909	0,927	0,913	0,936	0,938	0,925	0,0131
6	4,01	3,92	3,82	3,89	3,91	3,91	0,872	0,899	0,881	0,912	0,916	0,896	0,0190
7	3,80	3,77	3,66	3,77	3,79	3,76	0,826	0,865	0,844	0,884	0,889	0,862	0,0266
8	3,57	3,61	3,48	3,64	3,66	3,59	0,777	0,827	0,802	0,852	0,859	0,824	0,0342
9	3,32	3,41	3,28	3,48	3,51	3,40	0,722	0,783	0,756	0,816	0,823	0,780	0,0420
10	3,06	3,20	3,05	3,29	3,34	3,19	0,666	0,732	0,704	0,772	0,783	0,731	0,0483
11	2,79	2,96	2,82	3,06	3,16	2,96	0,606	0,678	0,651	0,718	0,740	0,679	0,0531
12	2,47	2,70	2,56	2,82	2,95	2,70	0,538	0,619	0,590	0,661	0,692	0,620	0,0603
13	2,16	2,42	2,28	2,56	2,74	2,43	0,471	0,555	0,526	0,599	0,643	0,559	0,0663
14	1,88	2,11	2,01	2,27	2,49	2,15	0,409	0,483	0,465	0,533	0,584	0,495	0,0668
15	1,62	1,82	1,77	2,00	2,23	1,89	0,352	0,418	0,408	0,468	0,523	0,434	0,0647
16	1,37	1,56	1,52	1,73	1,97	1,63	0,298	0,358	0,350	0,407	0,461	0,375	0,0617
17	1,09	1,31	1,28	1,47	1,70	1,37	0,237	0,300	0,295	0,345	0,398	0,315	0,0602
18	0,83	1,03	1,01	1,20	1,44	1,10	0,180	0,237	0,234	0,282	0,338	0,254	0,0593
19	0,63	0,79	0,76	0,93	1,20	0,86	0,137	0,180	0,175	0,218	0,280	0,198	0,0543
20	0,50	0,62	0,58	0,72	0,92	0,67	0,108	0,142	0,133	0,169	0,215	0,153	0,0408
21	0,41	0,49	0,46	0,57	0,72	0,53	0,088	0,111	0,105	0,133	0,168	0,121	0,0306
22	0,33	0,39	0,36	0,45	0,56	0,42	0,073	0,089	0,083	0,106	0,132	0,096	0,0232
23	0,28	0,31	0,29	0,37	0,46	0,34	0,061	0,072	0,068	0,086	0,108	0,079	0,0187
24	0,24	0,26	0,24	0,30	0,38	0,29	0,052	0,060	0,056	0,070	0,090	0,066	0,0151
25	0,21	0,22	0,21	0,25	0,32	0,24	0,045	0,050	0,048	0,058	0,075	0,055	0,0120
26	0,18	0,19	0,18	0,20	0,27	0,20	0,039	0,043	0,041	0,048	0,064	0,047	0,0100
27	0,16	0,16	0,15	0,17	0,24	0,18	0,035	0,037	0,035	0,040	0,055	0,040	0,0085
28	0,14	0,14	0,13	0,15	0,21	0,15	0,031	0,033	0,031	0,034	0,049	0,036	0,0075
29	0,13	0,13	0,12	0,12	0,18	0,14	0,028	0,029	0,027	0,029	0,043	0,031	0,0065
30	0,12	0,11	0,11	0,10	0,16	0,12	0,026	0,025	0,024	0,024	0,037	0,027	0,0054
31	0,11	0,10	0,10	0,09	0,14	0,11	0,024	0,022	0,022	0,021	0,033	0,024	0,0049
32	0,10	0,09	0,09	0,08	0,13	0,10	0,022	0,020	0,020	0,018	0,030	0,022	0,0048

8.3. táblázat A paszternák száradási sebesség és disszipált energia adatai a $P_M = 456,8$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Száradási sebesség S [kg/kg min]						Disszipált energia $q_{d,60s}$ [J/lmin]					
	A mérés száma						A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,022	0,021	0,024	0,020	0,020	0,022	5527,19	4691,17	4770,04	4426,17	3531,78	4589,27
2	0,052	0,042	0,051	0,038	0,037	0,044	5489,33	4527,12	4516,08	4517,65	3650,09	4540,05
3	0,085	0,064	0,078	0,054	0,053	0,067	5943,62	4998,76	5041,35	4703,79	3809,40	4899,38
4	0,117	0,089	0,099	0,077	0,069	0,090	6763,86	5385,22	5467,25	4785,81	4129,62	5306,35
5	0,141	0,101	0,124	0,085	0,084	0,107	7429,52	5691,24	6197,58	5079,21	4473,49	5774,21
6	0,171	0,122	0,138	0,101	0,097	0,126	8554,20	6323,77	6808,03	5389,95	4896,23	6394,44
7	0,212	0,147	0,161	0,118	0,115	0,151	9894,99	6926,33	7951,64	6276,45	5542,96	7318,47
8	0,224	0,168	0,181	0,137	0,127	0,167	11898,28	8008,43	9719,90	6918,45	6289,07	8566,82
9	0,254	0,194	0,200	0,155	0,153	0,191	13783,26	10267,25	11108,00	8240,30	7784,44	10236,65
10	0,260	0,218	0,226	0,188	0,172	0,213	14658,72	12808,43	12245,30	10592,20	9525,88	11966,11
11	0,274	0,236	0,229	0,231	0,184	0,231	13705,97	14972,62	11390,36	12636,50	11584,38	12857,96
12	0,313	0,258	0,266	0,242	0,202	0,256	14993,12	15917,48	12300,51	13346,33	12892,04	13889,89
13	0,310	0,280	0,277	0,263	0,211	0,268	18381,36	15474,23	16822,90	13051,35	13041,89	15354,35
14	0,282	0,313	0,264	0,284	0,249	0,278	19329,38	16851,29	18976,04	16370,19	13877,91	17080,96
15	0,265	0,286	0,245	0,275	0,263	0,267	17796,15	18319,85	18114,79	18240,98	17053,20	17904,99
16	0,249	0,261	0,252	0,263	0,266	0,258	14769,13	16449,06	16406,47	17337,13	18023,30	16597,02
17	0,278	0,251	0,240	0,262	0,267	0,259	13199,63	13256,41	13712,28	15187,14	17087,90	14488,67
18	0,263	0,276	0,263	0,270	0,255	0,266	16296,05	12024,47	11903,01	12743,76	16367,03	13866,86
19	0,199	0,248	0,257	0,273	0,248	0,245	19203,19	15007,32	15363,81	14740,74	13702,82	15603,58
20	0,132	0,168	0,181	0,207	0,279	0,194	20955,67	18097,43	18647,94	18316,69	15351,19	18273,79
21	0,090	0,132	0,121	0,157	0,200	0,140	21395,76	19813,64	20607,07	20801,09	18882,98	20300,11
22	0,072	0,099	0,095	0,115	0,153	0,107	21264,84	20523,46	21208,05	21922,61	21468,32	21277,46
23	0,055	0,073	0,068	0,084	0,103	0,076	20935,16	20592,87	21179,66	21987,29	22372,17	21413,43
24	0,038	0,052	0,052	0,068	0,078	0,058	20509,27	20431,98	20883,11	21548,77	22269,64	21128,55
25	0,034	0,042	0,034	0,053	0,063	0,045	20137,00	20119,65	20543,97	21055,05	21802,73	20731,68
26	0,026	0,032	0,031	0,042	0,047	0,036	19741,08	19824,68	20201,68	20662,28	21156,00	20317,14
27	0,020	0,025	0,023	0,034	0,037	0,028	19447,68	19368,81	19838,88	20152,78	20540,82	19869,79
28	0,018	0,018	0,020	0,024	0,028	0,022	19206,34	19116,43	19509,20	19720,57	20080,22	19526,55
29	0,013	0,017	0,015	0,022	0,026	0,019	18916,10	18892,44	19299,41	19386,16	19569,14	19212,65
30	0,010	0,017	0,012	0,019	0,025	0,017	18756,78	18728,39	19070,69	19081,73	19211,07	18969,73
31	0,010	0,013	0,010	0,015	0,017	0,013	18608,51	18523,33	18911,37	18860,89	18974,46	18775,71
32	0,009	0,011	0,010	0,013	0,013	0,011	18551,72	18416,07	18778,87	18660,56	18651,10	18611,66

8.4. táblázat A paszternák fajlagos- és relatív energiaigényének adatai a $P_M = 456,8$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Fajlagos energiaigény q_f [J/g víz]						Relatív energiaigény q_r [-]					
	A mérés száma						A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	17272,46	14659,90	13250,10	14753,89	11392,85	14265,84	5,1950	5,0230	4,3970	4,7467	3,1467	4,0545
2	7418,01	7185,90	5865,04	7925,71	6518,01	6982,53	2,2311	2,4621	1,9463	2,5499	1,8003	1,9845
3	4912,08	5207,04	4308,85	5736,33	4702,97	4973,45	1,4774	1,7841	1,4299	1,8455	1,2990	1,4135
4	4050,22	4049,04	3694,08	4090,44	3932,97	3963,35	1,2182	1,3873	1,2259	1,3160	1,0863	1,1264
5	3696,28	3794,16	3332,03	3937,37	3522,43	3656,45	1,1117	1,3000	1,1057	1,2668	0,9729	1,0392
6	3491,51	3474,60	3288,90	3499,97	3330,77	3417,15	1,0501	1,1905	1,0914	1,1260	0,9200	0,9712
7	3265,67	3148,33	3285,80	3486,92	3185,61	3274,47	0,9822	1,0787	1,0904	1,1218	0,8799	0,9306
8	3718,21	3203,37	3586,68	3326,18	3258,58	3418,60	1,1183	1,0976	1,1902	1,0701	0,9000	0,9716
9	3797,04	3552,68	3702,67	3491,65	3340,96	3577,00	1,1420	1,2173	1,2287	1,1234	0,9228	1,0166
10	3951,14	3928,97	3612,18	3716,56	3649,76	3771,72	1,1884	1,3462	1,1987	1,1957	1,0081	1,0720
11	3496,42	4253,58	3311,15	3600,14	4152,11	3762,68	1,0516	1,4574	1,0988	1,1583	1,1468	1,0694
12	3354,17	4134,41	3082,84	3626,72	4199,36	3679,50	1,0088	1,4166	1,0230	1,1668	1,1599	1,0458
13	4149,29	3701,97	4043,97	3271,02	4062,89	3845,83	1,2480	1,2684	1,3420	1,0524	1,1222	1,0930
14	4796,37	3608,41	4791,93	3789,40	3671,40	4131,50	1,4426	1,2364	1,5902	1,2191	1,0140	1,1742
15	4707,98	4300,43	4935,91	4363,87	4273,98	4516,43	1,4160	1,4735	1,6380	1,4040	1,1805	1,2836
16	4148,63	4217,71	4340,34	4334,28	4461,21	4300,43	1,2478	1,4451	1,4403	1,3945	1,2322	1,2222
17	3324,84	3544,50	3808,97	3815,87	4219,24	3742,68	1,0000	1,2145	1,2640	1,2277	1,1654	1,0637
18	4334,06	2918,56	3013,42	3108,23	4218,31	3518,52	1,3035	1,0000	1,0000	1,0000	1,1651	1,0000
19	6737,96	4056,03	3990,60	3560,57	3644,37	4397,90	2,0265	1,3897	1,3243	1,1455	1,0066	1,2499
20	11087,66	7210,13	6881,16	5814,82	3620,56	6922,87	3,3348	2,4704	2,2835	1,8708	1,0000	1,9676
21	16715,44	10057,68	11385,12	8703,38	6211,51	10614,63	5,0274	3,4461	3,7781	2,8001	1,7156	3,0168
22	20645,48	13961,54	14830,81	12527,21	9253,59	14243,72	6,2095	4,7837	4,9216	4,0303	2,5558	4,0482
23	26839,95	18892,54	20764,37	17312,82	14341,13	19630,17	8,0725	6,4732	6,8906	5,5700	3,9610	5,5791
24	37289,58	26194,84	26773,22	20719,97	18872,58	25970,04	11,2154	8,9753	8,8847	6,6662	5,2126	7,3810
25	41952,09	31935,96	40282,30	26318,81	22711,18	32640,07	12,6178	10,9424	13,3676	8,4674	6,2728	9,2767
26	53354,26	41301,42	42982,29	32284,81	29383,33	39861,22	16,0472	14,1513	14,2636	10,3869	8,1157	11,3290
27	67060,97	50970,56	56682,50	39515,25	36680,03	50181,86	20,1697	17,4643	18,8100	12,7131	10,1310	14,2622
28	73870,54	70801,59	65030,67	53298,84	47810,04	62162,34	22,2178	24,2591	21,5804	17,1476	13,2051	17,6672
29	99558,43	72663,23	83910,47	57018,13	50177,29	72665,51	29,9438	24,8969	27,8456	18,3442	13,8590	20,6523
30	125045,23	72032,27	105948,25	65799,06	50555,46	83876,05	37,6094	24,6808	35,1588	21,1693	13,9634	23,8385
31	132917,92	97491,21	126075,79	82003,88	72978,71	102293,50	39,9772	33,4039	41,8381	26,3828	20,1567	29,0729
32	142705,56	115100,42	125192,45	98213,49	98163,68	115875,12	42,9210	39,4374	41,5450	31,5978	27,1128	32,9330

8.5. táblázat A paszternák tömegvesztési és nedves bázison számított nedvességtartalom adatai a $P_M = 523$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Tömegvesztés [g]					Nedvességtartalom (nedves bázis) w [%]					
	A mérés száma					A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0	0	0	0	0	81,03	81,25	80,04	80,16	80,46	80,59
1	0,66	1,13	0,80	1,02	0,86	80,87	80,98	79,84	79,91	80,25	80,37
2	2,94	5,26	4,06	5,48	4,12	80,30	79,93	78,97	78,70	79,40	79,46
3	7,06	11,19	9,25	11,57	9,23	79,19	78,20	77,43	76,81	77,91	77,91
4	12,83	17,17	15,36	17,61	14,57	77,40	76,13	75,29	74,56	76,11	75,90
5	19,08	23,50	22,02	24,80	20,28	75,08	73,45	72,46	71,25	73,83	73,21
6	25,40	29,88	28,98	29,80	26,74	72,20	70,07	68,70	68,39	70,65	70,00
7	32,43	34,87	34,89	35,09	33,02	68,09	66,76	64,60	64,66	66,73	66,17
8	38,58	39,65	39,36	40,32	39,28	63,35	62,83	60,70	60,01	61,62	61,70
9	43,98	44,49	43,83	45,52	44,99	57,86	57,76	55,85	53,97	55,36	56,16
10	49,48	49,67	49,05	50,53	50,30	50,26	50,54	48,40	46,15	47,37	48,55
11	53,98	53,12	52,80	53,85	53,54	41,66	44,20	41,29	39,31	40,93	41,48
12	56,70	55,59	54,95	56,03	55,79	34,85	38,55	36,25	33,79	35,44	35,78
13	58,47	57,19	56,78	57,46	57,25	29,49	34,24	31,22	29,59	31,30	31,17
14	59,87	58,39	58,09	58,57	58,42	24,59	30,59	27,11	25,94	27,57	27,16
15	60,80	59,30	59,10	59,36	59,18	20,94	27,54	23,59	23,11	24,93	24,02
16	61,52	60,04	59,91	60,07	59,84	17,86	24,85	20,51	20,37	22,47	21,21
17	62,04	60,57	60,59	60,59	60,34	15,48	22,80	17,72	18,24	20,50	18,95
18	62,45	61,02	61,07	61,03	60,79	13,50	20,97	15,64	16,34	18,64	17,02
19	62,74	61,39	61,46	61,43	61,16	12,05	19,40	13,86	14,54	17,04	15,38
20	63,02	61,69	61,80	61,72	61,48	10,60	18,08	12,25	13,18	15,60	13,94

8.6. táblázat A paszternák száraz bázison számított nedvességtartalom és nedvességviszony adatai a $P_M = 523$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Nedvességtartalom (száraz bázis) X [kg/kg]						Nedvességviszony Y [-]						
	A mérés száma						A mérés száma						szórás s
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	
0	4,27	4,33	4,01	4,04	4,12	4,15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,000	0,0000
1	4,23	4,26	3,96	3,98	4,06	4,10	0,990	0,983	0,988	0,984	0,987	0,986	0,0028
2	4,08	3,98	3,76	3,70	3,85	3,87	0,955	0,919	0,937	0,915	0,936	0,932	0,0160
3	3,81	3,59	3,43	3,31	3,53	3,53	0,891	0,828	0,856	0,820	0,857	0,850	0,0282
4	3,42	3,19	3,05	2,93	3,19	3,16	0,802	0,736	0,760	0,725	0,774	0,759	0,0306
5	3,01	2,77	2,63	2,48	2,82	2,74	0,706	0,638	0,656	0,613	0,685	0,660	0,0366
6	2,60	2,34	2,19	2,16	2,41	2,34	0,608	0,540	0,547	0,535	0,585	0,563	0,0317
7	2,13	2,01	1,82	1,83	2,01	1,96	0,500	0,464	0,455	0,453	0,487	0,472	0,0207
8	1,73	1,69	1,54	1,50	1,61	1,61	0,405	0,390	0,385	0,371	0,390	0,388	0,0120
9	1,37	1,37	1,26	1,17	1,24	1,28	0,322	0,316	0,315	0,290	0,301	0,309	0,0128
10	1,01	1,02	0,94	0,86	0,90	0,95	0,237	0,236	0,234	0,212	0,219	0,227	0,0113
11	0,71	0,79	0,70	0,65	0,69	0,71	0,167	0,183	0,175	0,160	0,168	0,171	0,0086
12	0,53	0,63	0,57	0,51	0,55	0,56	0,125	0,145	0,142	0,126	0,133	0,134	0,0088
13	0,42	0,52	0,45	0,42	0,46	0,45	0,098	0,120	0,113	0,104	0,111	0,109	0,0085
14	0,33	0,44	0,37	0,35	0,38	0,37	0,076	0,102	0,093	0,087	0,092	0,090	0,0093
15	0,26	0,38	0,31	0,30	0,33	0,32	0,062	0,088	0,077	0,074	0,081	0,076	0,0094
16	0,22	0,33	0,26	0,26	0,29	0,27	0,051	0,076	0,064	0,063	0,070	0,065	0,0095
17	0,18	0,30	0,22	0,22	0,26	0,23	0,043	0,068	0,054	0,055	0,063	0,057	0,0096
18	0,16	0,27	0,19	0,20	0,23	0,21	0,037	0,061	0,046	0,048	0,056	0,050	0,0094
19	0,14	0,24	0,16	0,17	0,21	0,18	0,032	0,056	0,040	0,042	0,050	0,044	0,0091
20	0,12	0,22	0,14	0,15	0,18	0,16	0,028	0,051	0,035	0,038	0,045	0,039	0,0090

8.7. táblázat A paszternák száradási sebesség és disszipált energia adatai a $P_M = 523$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Száradási sebesség S [kg/kg min]						Disszipált energia $q_{d,60s}$ [J/lmin]					
	A mérés száma						A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,043	0,075	0,050	0,064	0,055	0,058	10593,77	13628,68	13630,26	13805,35	13045,04	12940,62
2	0,150	0,275	0,204	0,281	0,209	0,224	11174,25	14896,90	15278,63	15997,92	13758,02	14221,15
3	0,271	0,395	0,325	0,384	0,327	0,340	13699,66	19200,03	19078,57	19925,63	18231,51	18027,08
4	0,380	0,399	0,383	0,381	0,342	0,377	17975,97	23187,68	21279,04	23873,85	22501,52	21763,61
5	0,412	0,422	0,417	0,453	0,365	0,414	22078,77	22900,60	21214,36	23294,94	22771,25	22451,99
6	0,416	0,425	0,436	0,315	0,413	0,401	21615,02	24149,89	22373,75	23440,07	22383,21	22792,39
7	0,463	0,333	0,370	0,333	0,402	0,380	20668,59	24142,01	24812,40	23780,78	23785,51	23437,86
8	0,405	0,319	0,280	0,330	0,401	0,347	24490,61	20458,79	21911,57	21170,20	22263,33	22058,90
9	0,356	0,323	0,280	0,328	0,365	0,330	22372,17	17324,51	17359,21	17834,01	20064,44	18990,87
10	0,362	0,345	0,327	0,316	0,340	0,338	18684,22	20031,32	17860,82	20171,71	21170,20	19583,65
11	0,296	0,230	0,235	0,209	0,207	0,236	21387,88	22902,17	21190,70	23055,18	24386,50	22584,49
12	0,179	0,165	0,135	0,137	0,144	0,152	24310,79	23899,09	23039,41	24030,01	25072,67	24070,39
13	0,117	0,107	0,115	0,090	0,093	0,104	24626,26	23632,51	23328,07	23646,70	24242,96	23895,30
14	0,092	0,080	0,082	0,070	0,075	0,080	23908,55	22826,46	22957,38	22829,61	23088,31	23122,06
15	0,061	0,061	0,063	0,050	0,049	0,057	22928,99	22086,66	22351,66	22033,03	22067,73	22293,62
16	0,047	0,049	0,051	0,045	0,042	0,047	22115,05	21244,33	21755,41	21260,11	21129,18	21500,82
17	0,034	0,035	0,043	0,033	0,032	0,035	21282,19	20610,22	21170,20	20679,63	20443,02	20837,05
18	0,027	0,030	0,030	0,028	0,029	0,029	20723,79	20182,75	20682,78	20264,77	19884,62	20347,74
19	0,019	0,025	0,024	0,025	0,024	0,023	20236,38	19720,57	20321,56	19813,64	19471,34	19912,70
20	0,018	0,020	0,021	0,018	0,020	0,020	19865,69	19354,62	19968,22	19554,95	19177,95	19584,28

8.8. táblázat A paszternák fajlagos- és relatív energiaigényének adatai a $P_M = 523$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Fajlagos energiaigény q_f [J/g víz]						Relatív energiaigény q_r [-]					
	A mérés száma						A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	16051,17	12060,78	17037,82	13534,65	15168,65	14770,62	5,4595	3,3695	5,3001	4,1775	4,3778	4,2049
2	4900,99	3607,00	4686,70	3586,98	4220,25	4200,38	1,6670	1,0077	1,4579	1,1071	1,2180	1,1958
3	3325,16	3237,78	3676,03	3271,86	3567,81	3415,73	1,1310	0,9045	1,1435	1,0099	1,0297	0,9724
4	3115,42	3877,54	3482,66	3952,62	4213,77	3728,40	1,0596	1,0833	1,0834	1,2200	1,2161	1,0614
5	3532,60	3617,79	3185,34	3239,91	3987,96	3512,72	1,2015	1,0107	0,9909	1,0000	1,1510	1,0000
6	3420,10	3785,25	3214,62	4688,01	3464,89	3714,57	1,1633	1,0575	1,0000	1,4470	1,0000	1,0575
7	2940,05	4838,08	4198,38	4495,42	3787,50	4051,89	1,0000	1,3516	1,3060	1,3875	1,0931	1,1535
8	3982,21	4280,08	4901,92	4047,84	3556,44	4153,70	1,3545	1,1957	1,5249	1,2494	1,0264	1,1825
9	4142,99	3579,44	3883,49	3429,62	3513,91	3709,89	1,4092	1,0000	1,2081	1,0586	1,0141	1,0561
10	3397,13	3867,05	3421,61	4026,29	3986,85	3739,79	1,1555	1,0803	1,0644	1,2427	1,1506	1,0646
11	4752,86	6638,31	5650,85	6944,33	7526,70	6302,61	1,6166	1,8546	1,7579	2,1434	2,1723	1,7942
12	8937,79	9675,74	10716,00	11022,94	11143,41	10299,18	3,0400	2,7031	3,3335	3,4022	3,2161	2,9320
13	13913,14	14770,32	12747,58	16536,16	16604,77	14914,39	4,7323	4,1264	3,9655	5,1039	4,7923	4,2458
14	17077,54	19022,05	17524,72	20567,22	19733,60	18785,02	5,8086	5,3142	5,4516	6,3481	5,6953	5,3477
15	24654,83	24271,06	22130,36	27889,91	29036,49	25596,53	8,3858	6,7807	6,8843	8,6082	8,3802	7,2868
16	30715,35	28708,56	26858,53	29943,81	32013,92	29648,03	10,4472	8,0204	8,3551	9,2422	9,2395	8,4402
17	40927,29	38887,21	31132,64	39768,51	40886,04	38320,34	13,9206	10,8640	9,6847	12,2746	11,8001	10,9090
18	50545,84	44850,55	43089,13	46056,30	44188,05	45745,97	17,1921	12,5300	13,4041	14,2153	12,7531	13,0229
19	69780,62	53298,84	52106,56	49534,09	52625,25	55469,07	23,7345	14,8903	16,2092	15,2887	15,1881	15,7909
20	70948,90	64515,39	58730,07	67430,85	59931,09	64311,26	24,1318	18,0239	18,2697	20,8126	17,2967	18,3081

8.9. táblázat A paszternák tömegvesztési és nedves bázison számított nedvességtartalom adatai a $P_M = 554,6$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Tömegvesztés [g]					Nedvességtartalom (nedves bázis) w [%]					
	A mérés száma					A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0	0	0	0	0	79,89	80,31	79,88	79,96	80,76	80,16
1	1,87	1,89	1,93	1,83	1,58	79,41	79,84	79,38	79,49	80,37	79,70
2	7,67	8,17	8,28	8,18	7,85	77,75	78,07	77,55	77,68	78,67	77,95
3	15,13	15,87	16,62	16,15	16,58	75,20	75,44	74,60	74,89	75,73	75,17
4	22,87	23,94	24,98	23,79	25,46	71,84	71,91	70,74	71,48	71,78	71,55
5	30,85	32,67	32,40	30,79	33,07	67,26	66,72	66,18	67,43	67,21	66,96
6	38,08	40,42	40,58	37,88	41,08	61,62	60,21	59,16	61,94	60,46	60,68
7	44,37	47,28	47,83	43,99	48,28	54,84	51,86	49,95	55,48	51,48	52,73
8	50,67	53,01	52,49	49,76	53,10	45,14	41,65	41,48	46,99	42,79	43,61
9	54,28	56,53	55,48	53,64	56,26	37,44	32,89	34,34	39,19	35,17	35,81
10	56,65	58,61	57,68	56,36	58,44	31,09	26,37	27,87	32,19	28,62	29,23
11	58,25	60,05	59,20	58,24	60,03	26,02	21,05	22,60	26,33	22,93	23,79
12	59,37	61,01	60,29	59,61	61,20	22,01	17,06	18,32	21,38	18,14	19,38
13	60,17	61,81	60,96	60,54	61,92	18,86	13,41	15,44	17,63	14,88	16,04
14	60,75	62,36	61,53	61,19	62,49	16,42	10,71	12,83	14,78	12,11	13,37

8.10. táblázat A paszternák száraz bázison számított nedvességtartalom és nedvességviszony adatai a $P_M = 554,6$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Nedvességtartalom (száraz bázis) X [kg/kg]						Nedvességviszony Y [-]						szórás s
	A mérés száma						A mérés száma						
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	
0	3,97	4,08	3,97	3,99	4,20	4,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,000	0,0000
1	3,86	3,96	3,85	3,88	4,10	3,93	0,971	0,971	0,970	0,971	0,976	0,972	0,0023
2	3,50	3,56	3,45	3,48	3,69	3,54	0,880	0,873	0,870	0,872	0,879	0,875	0,0042
3	3,03	3,07	2,94	2,98	3,12	3,03	0,763	0,753	0,740	0,748	0,743	0,749	0,0091
4	2,55	2,56	2,42	2,51	2,54	2,52	0,642	0,627	0,609	0,628	0,606	0,623	0,0150
5	2,05	2,01	1,96	2,07	2,05	2,03	0,517	0,492	0,493	0,519	0,488	0,502	0,0150
6	1,61	1,51	1,45	1,63	1,53	1,54	0,404	0,371	0,365	0,408	0,364	0,382	0,0217
7	1,21	1,08	1,00	1,25	1,06	1,12	0,306	0,264	0,251	0,312	0,253	0,277	0,0295
8	0,82	0,71	0,71	0,89	0,75	0,78	0,207	0,175	0,179	0,222	0,178	0,192	0,0212
9	0,60	0,49	0,52	0,64	0,54	0,56	0,151	0,120	0,132	0,161	0,129	0,139	0,0169
10	0,45	0,36	0,39	0,47	0,40	0,41	0,114	0,088	0,097	0,119	0,095	0,103	0,0131
11	0,35	0,27	0,29	0,36	0,30	0,31	0,089	0,065	0,074	0,090	0,071	0,078	0,0109
12	0,28	0,21	0,22	0,27	0,22	0,24	0,071	0,050	0,056	0,068	0,053	0,060	0,0093
13	0,23	0,15	0,18	0,21	0,17	0,19	0,059	0,038	0,046	0,054	0,042	0,048	0,0085
14	0,20	0,12	0,15	0,17	0,14	0,15	0,049	0,029	0,037	0,043	0,033	0,038	0,0081

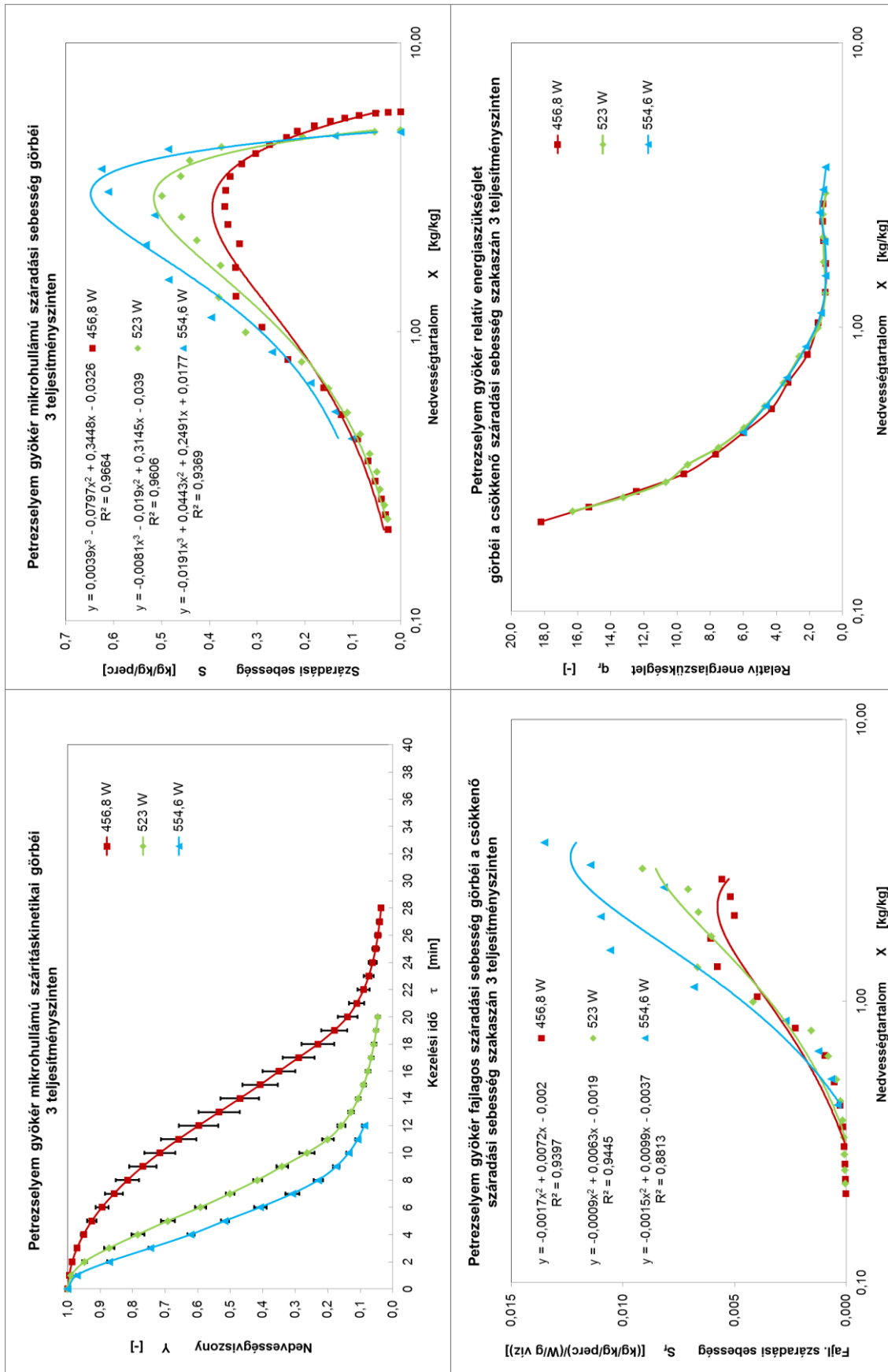
8.11. táblázat A paszternák száradási sebesség és disszipált energia adatai a $P_M = 554,6$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Száradási sebesség S [kg/kg min]						Disszipált energia $q_{d,60s}$ [J/lmin]					
	A mérés száma						A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,116	0,120	0,120	0,114	0,103	0,115	19827,83	18543,84	19824,68	20793,20	20580,25	19913,96
2	0,360	0,399	0,394	0,396	0,407	0,391	22444,73	21608,71	20954,09	22337,47	21547,19	21778,44
3	0,464	0,489	0,518	0,497	0,567	0,507	25698,89	24642,04	22903,75	24937,01	23203,46	24277,03
4	0,481	0,512	0,519	0,477	0,577	0,513	25623,18	24108,88	25780,92	27255,78	25834,55	25720,66
5	0,496	0,554	0,461	0,437	0,494	0,488	25295,08	23588,34	24653,08	26787,29	25730,44	25210,85
6	0,449	0,492	0,508	0,442	0,520	0,482	24173,55	23952,72	21223,83	24056,83	22176,57	23116,70
7	0,391	0,436	0,450	0,381	0,468	0,425	21031,39	20428,82	18772,56	21872,14	20021,85	20425,35
8	0,392	0,364	0,289	0,360	0,313	0,344	20638,61	20108,61	19778,94	17158,88	22634,02	20063,81
9	0,224	0,223	0,186	0,242	0,205	0,216	24392,81	24001,62	22676,61	18745,74	25336,09	23030,57
10	0,147	0,132	0,137	0,170	0,142	0,145	25569,55	25175,20	23872,27	21078,71	25577,43	24254,63
11	0,099	0,091	0,094	0,117	0,103	0,101	24948,05	24634,15	23798,13	22092,97	24624,69	24019,60
12	0,070	0,061	0,068	0,085	0,076	0,072	23837,57	23714,53	23212,92	22154,49	23477,92	23279,49
13	0,050	0,051	0,042	0,058	0,047	0,049	22862,74	22785,45	22517,29	21799,58	22365,86	22466,18
14	0,036	0,035	0,035	0,041	0,037	0,037	21944,70	22066,16	21824,81	21395,76	21403,65	21727,02

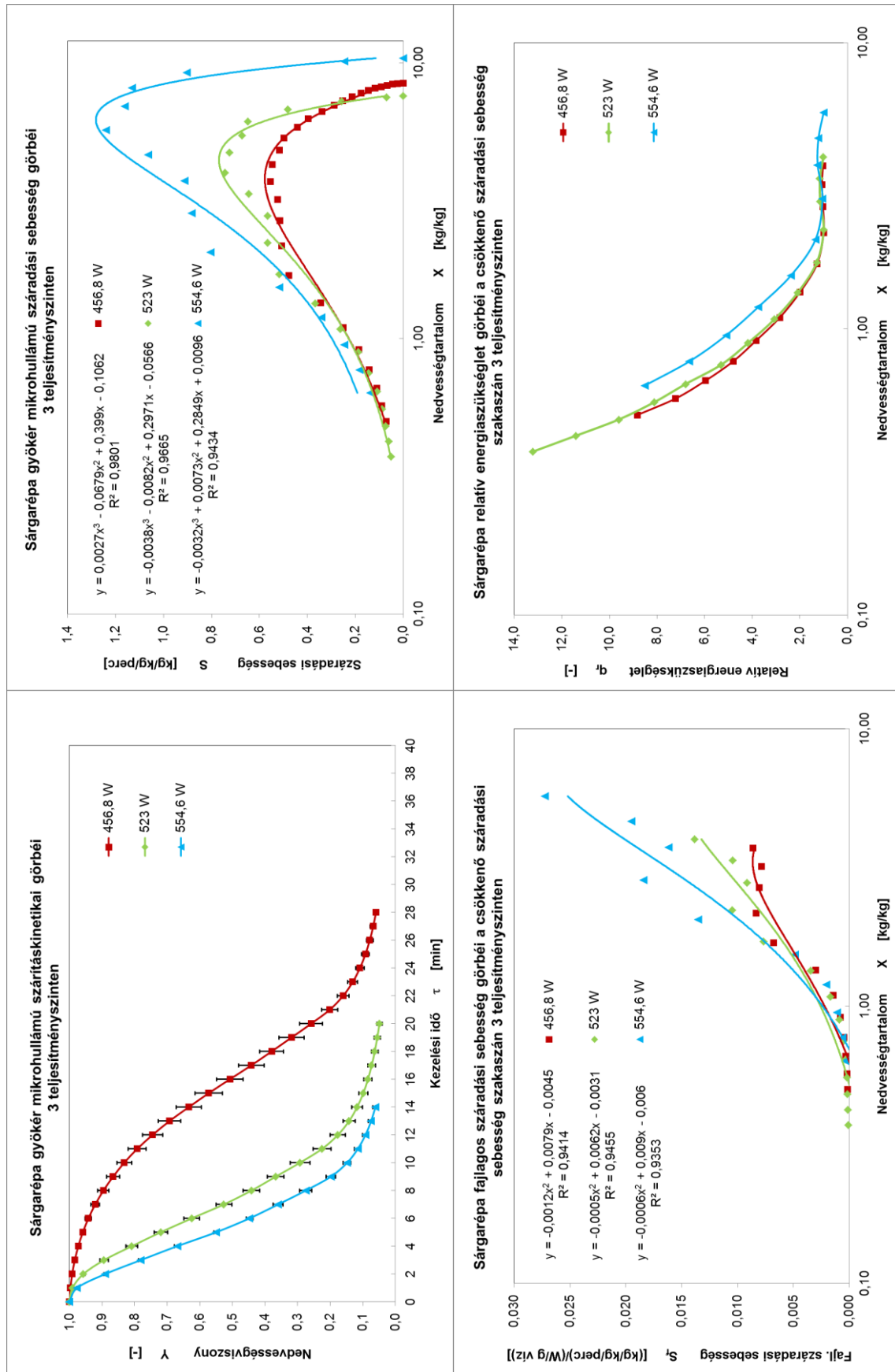
8.12. táblázat A paszternák fajlagos- és relatív energiaigényének adatai a $P_M = 554,6$ W-os teljesítményen.

Idő (min)	Fajlagos energiaigény q_f [J/g víz]						Relatív energiaigény q_r [-]					
	A mérés száma						A mérés száma					
	1.	2.	3.	4.	5.	átlag	1.	2.	3.	4.	5.	átlag
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	10603,12	9811,55	10271,85	11362,40	13025,48	11014,88	3,3450	3,6312	3,9670	3,8208	4,7047	3,6256
2	3869,78	3440,88	3299,86	3517,71	3436,55	3512,96	1,2208	1,2735	1,2744	1,1829	1,2413	1,1563
3	3444,89	3200,26	2746,25	3128,86	2657,90	3035,63	1,0868	1,1844	1,0606	1,0521	0,9600	0,9992
4	3310,49	2987,47	3083,84	3567,51	2909,30	3171,72	1,0444	1,1057	1,1910	1,1996	1,0508	1,0440
5	3169,81	2701,99	3322,52	3826,76	3381,14	3280,44	1,0000	1,0000	1,2832	1,2868	1,2212	1,0798
6	3343,51	3090,67	2594,60	3393,06	2768,61	3038,09	1,0548	1,1439	1,0020	1,1410	1,0000	1,0000
7	3343,62	2977,96	2589,32	3579,73	2780,81	3054,29	1,0548	1,1021	1,0000	1,2038	1,0044	1,0053
8	3275,97	3509,36	4244,41	2973,81	4695,85	3739,88	1,0335	1,2988	1,6392	1,0000	1,6961	1,2310
9	6757,01	6818,64	7584,15	4831,38	8017,75	6801,79	2,1317	2,5236	2,9290	1,6246	2,8959	2,2388
10	10788,84	12103,46	10851,03	7749,52	11732,77	10645,12	3,4036	4,4795	4,1907	2,6059	4,2378	3,5039
11	15592,53	17107,05	15656,67	11751,58	15487,22	15119,01	4,9191	6,3313	6,0466	3,9517	5,5939	4,9765
12	21283,54	24702,64	21296,26	16171,16	20066,60	20704,04	6,7145	9,1424	8,2247	5,4379	7,2479	6,8148
13	28578,42	28481,81	33607,90	23440,40	31063,69	29034,45	9,0158	10,5411	12,9794	7,8823	11,2200	9,5568
14	37835,68	40120,28	38289,15	32916,56	37550,26	37342,39	11,9363	14,8484	14,7873	11,0688	13,5629	12,2914

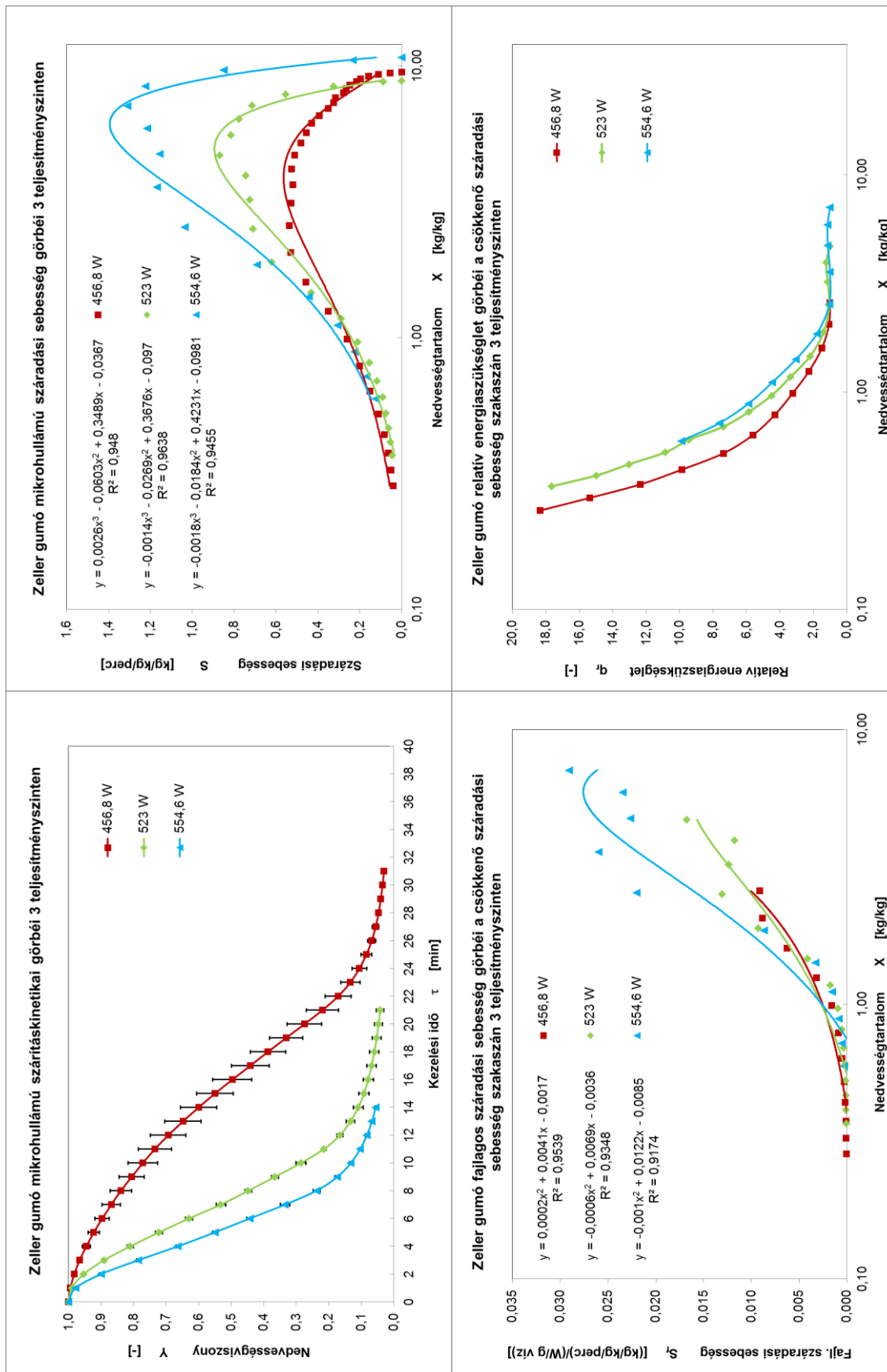
M3.2. A petrezselyem gyökér mérések eredményei



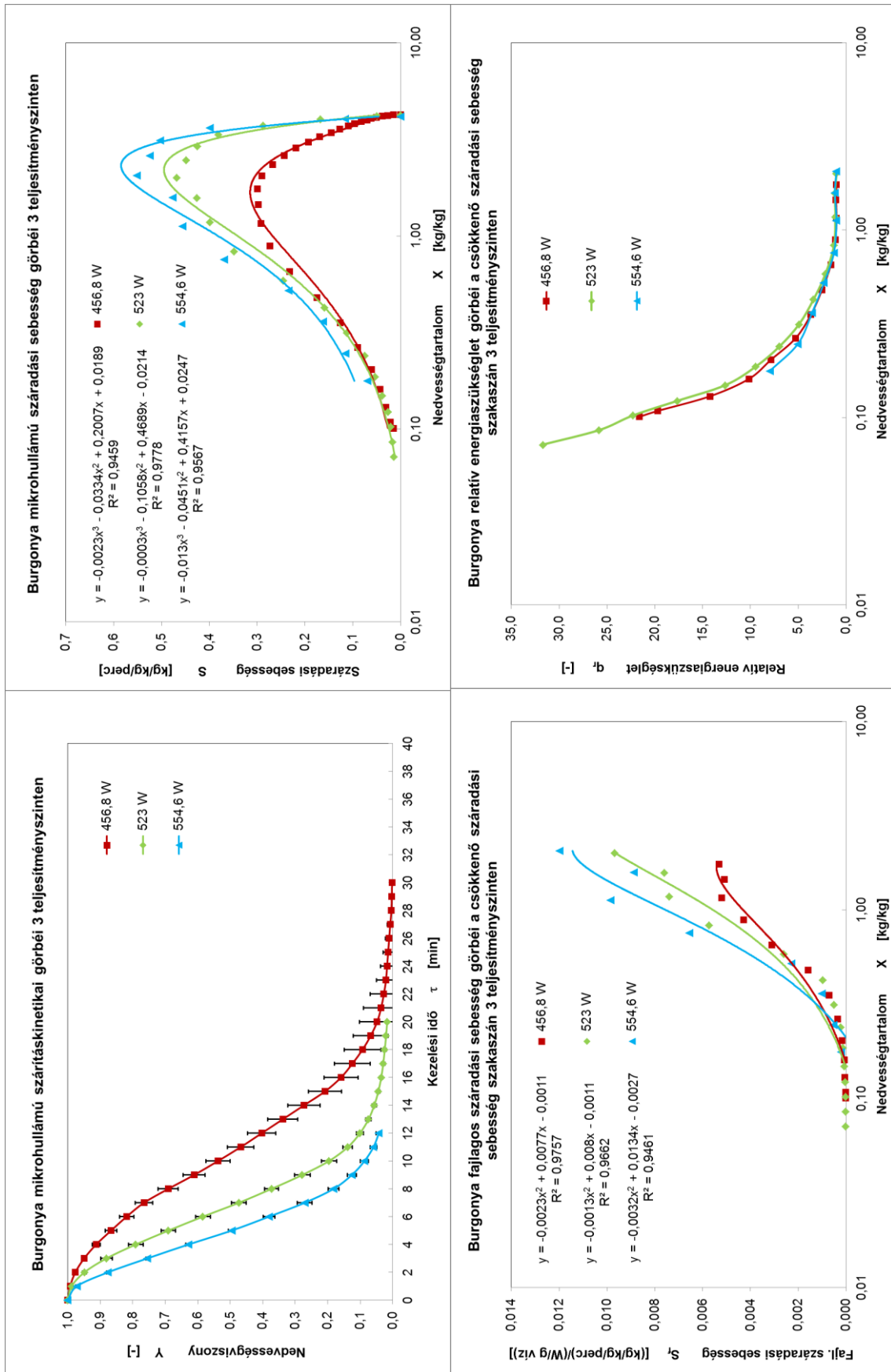
M3.3. A sárgarépa mérések eredményei



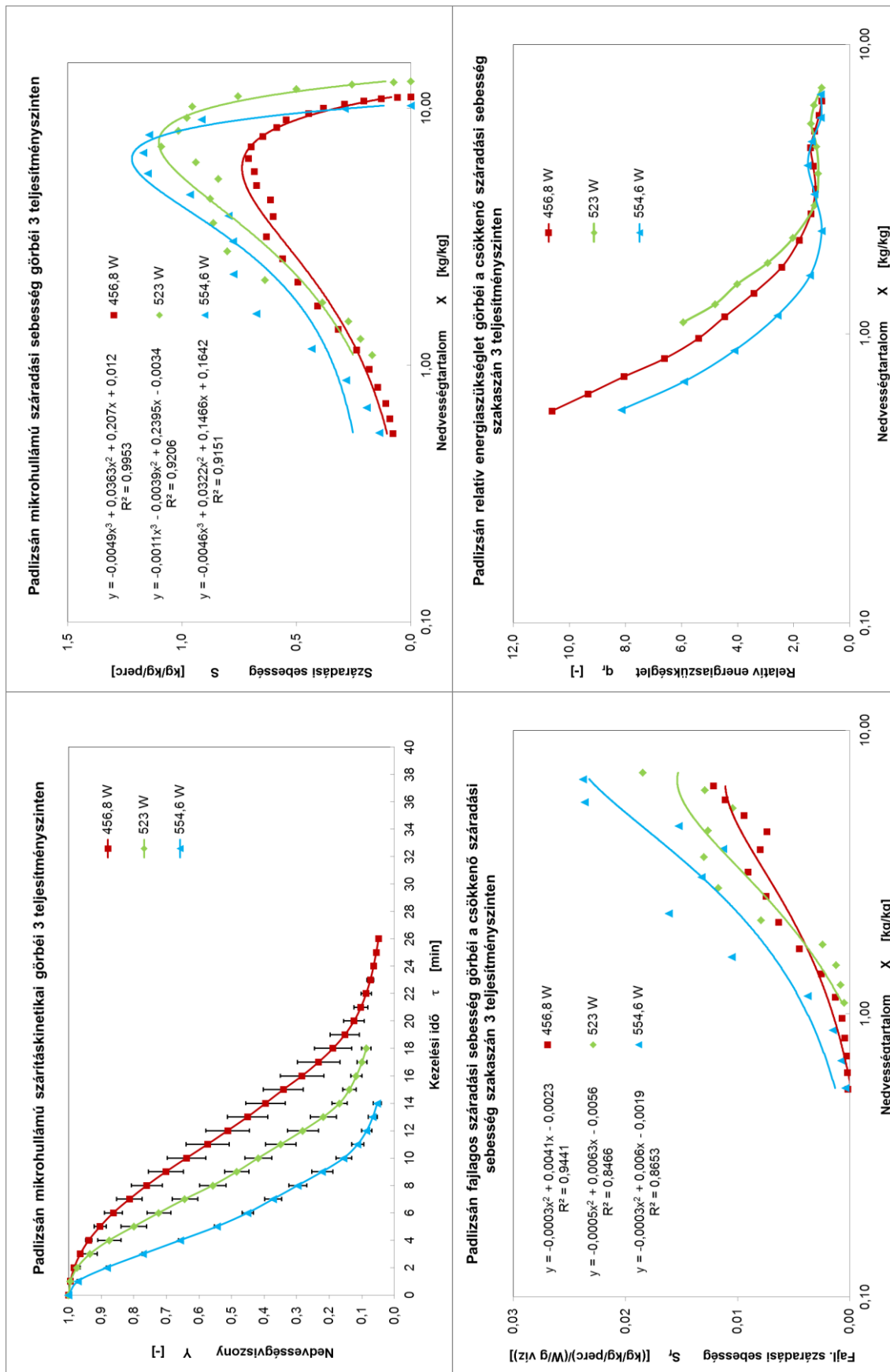
M3.4. A zeller gumó mérések eredményei



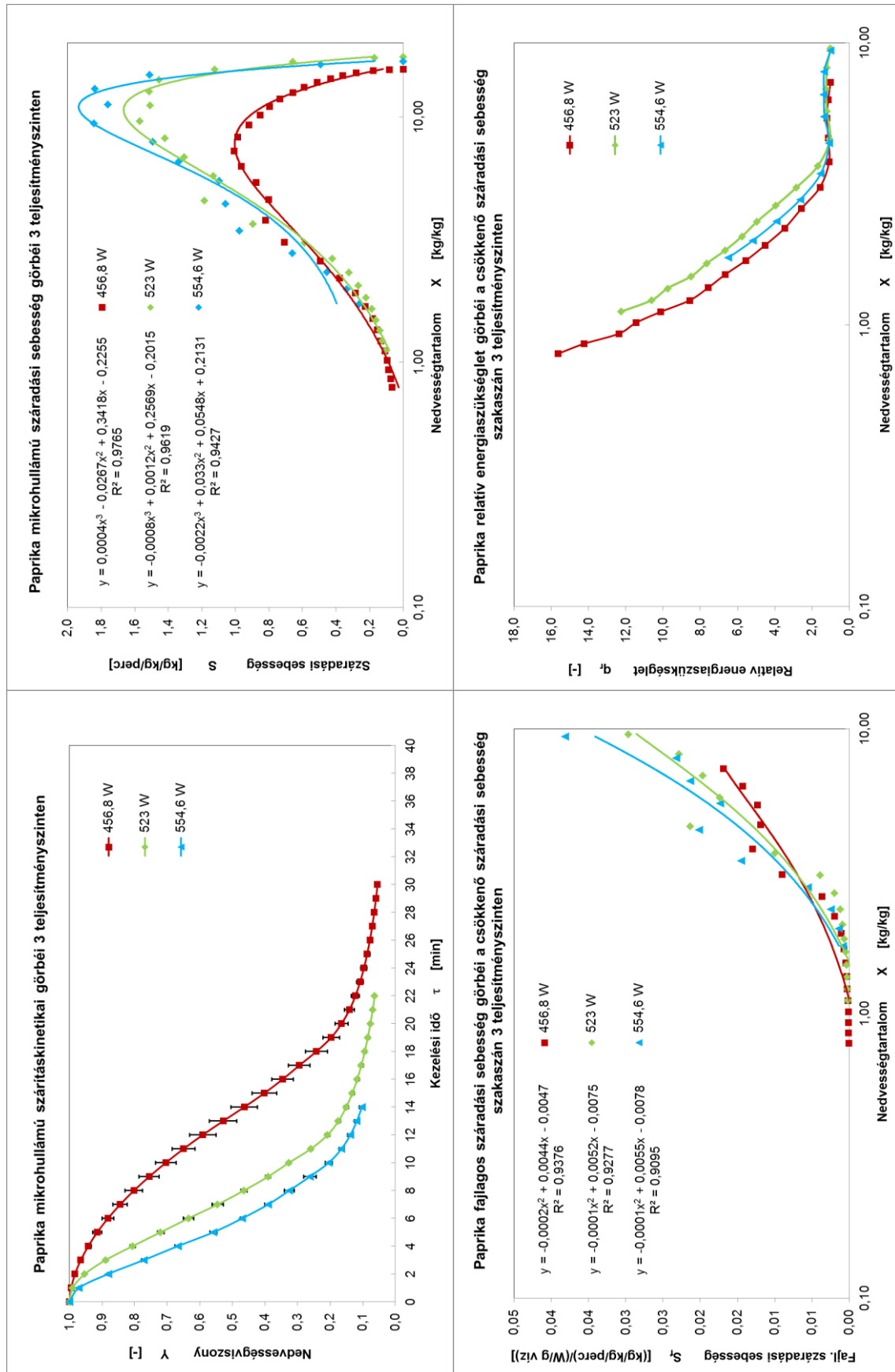
M3.5. A burgonya mérések eredményei



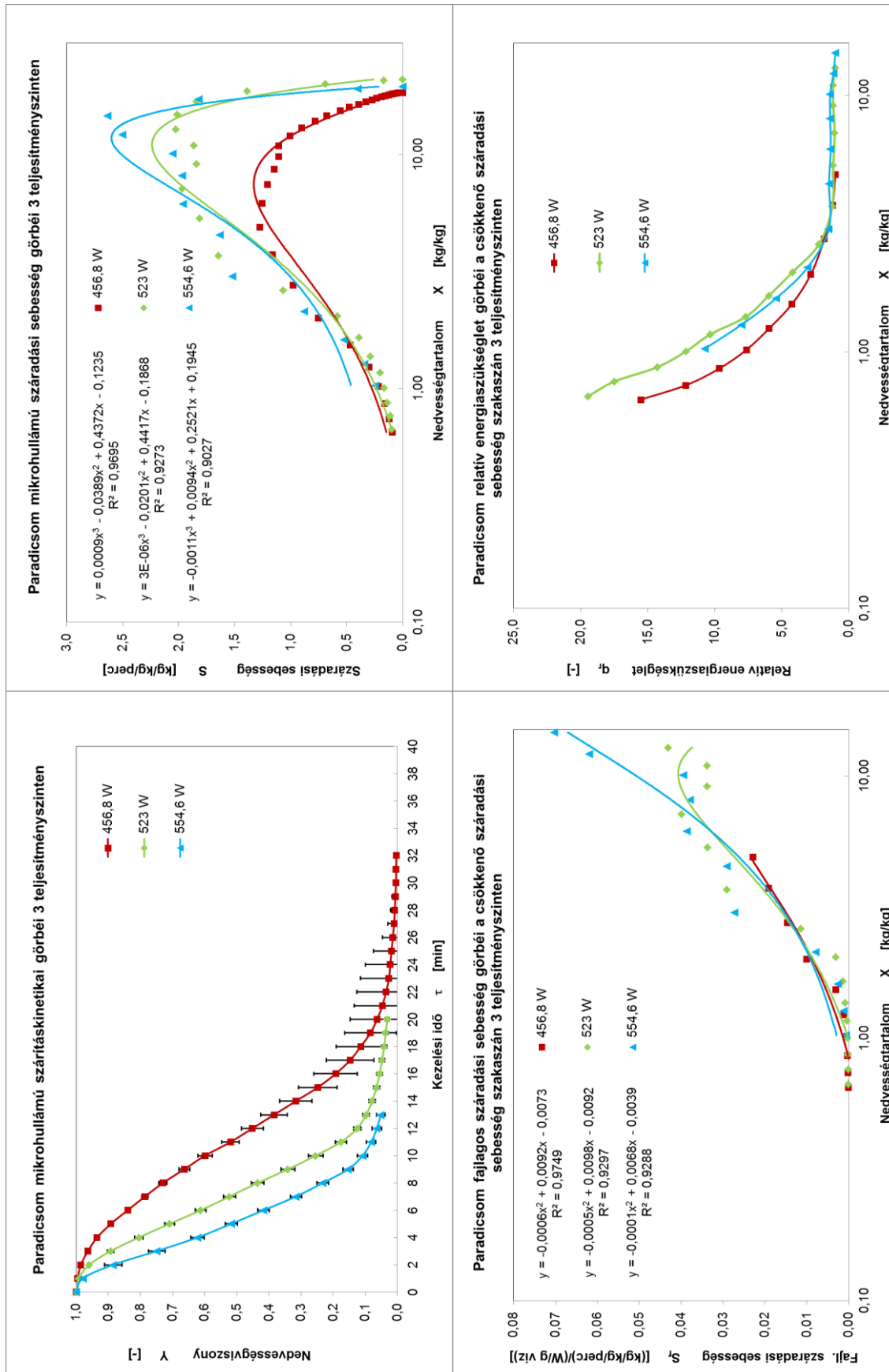
M3.6. A padlizsán mérések eredményei



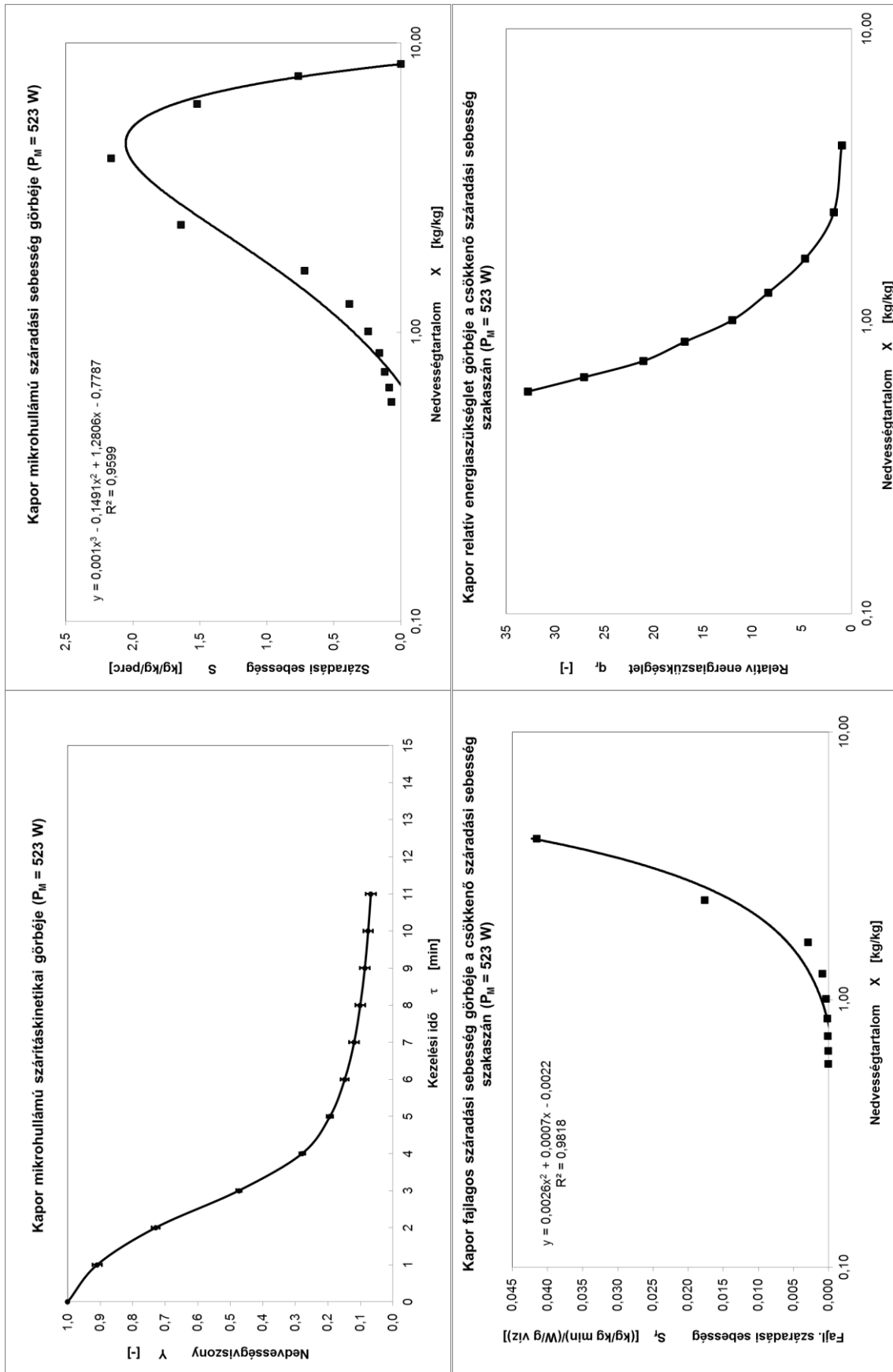
M3.7. A paprika mérések eredményei



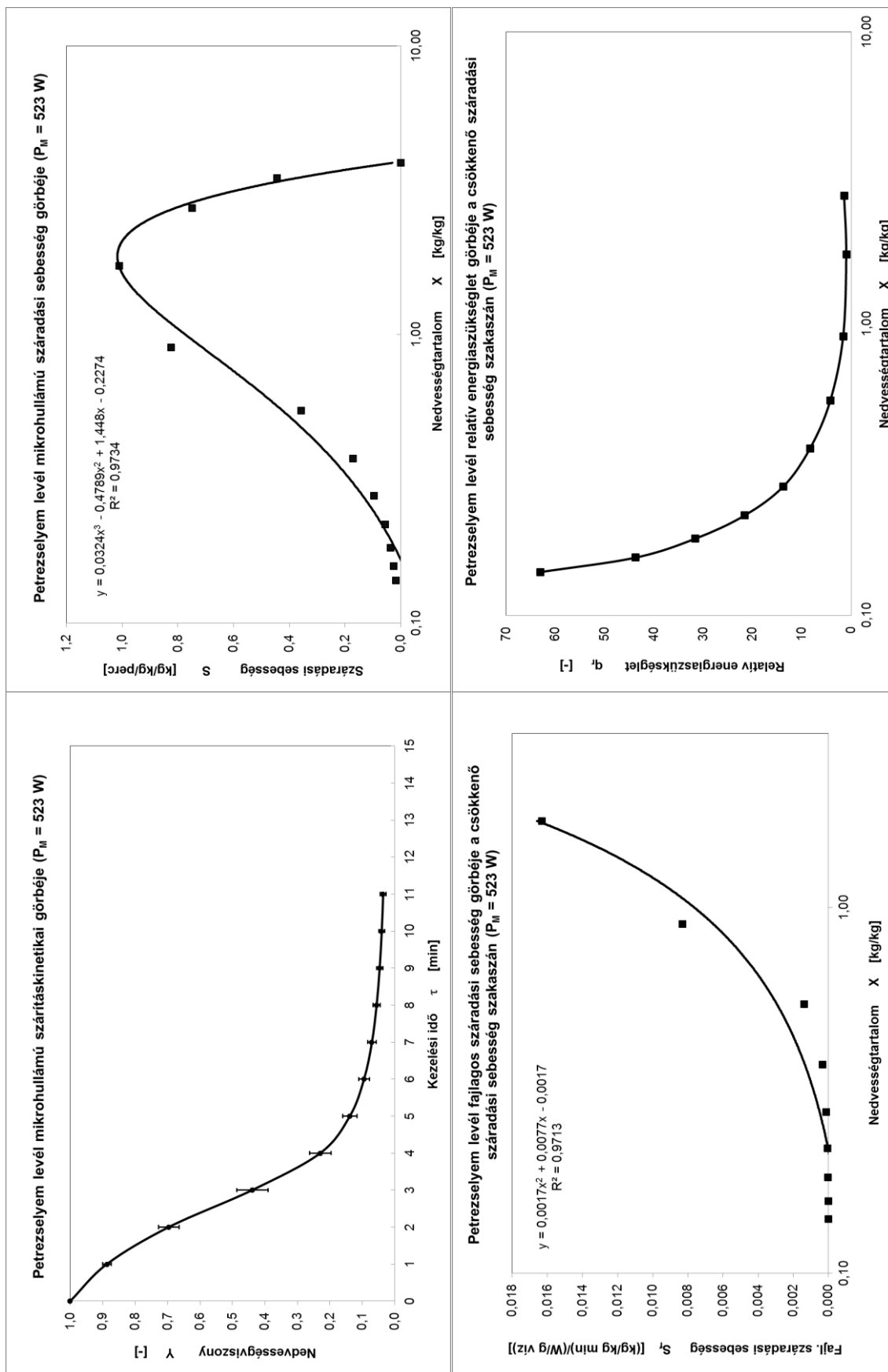
M3.8. A paradicsom mérések eredményei



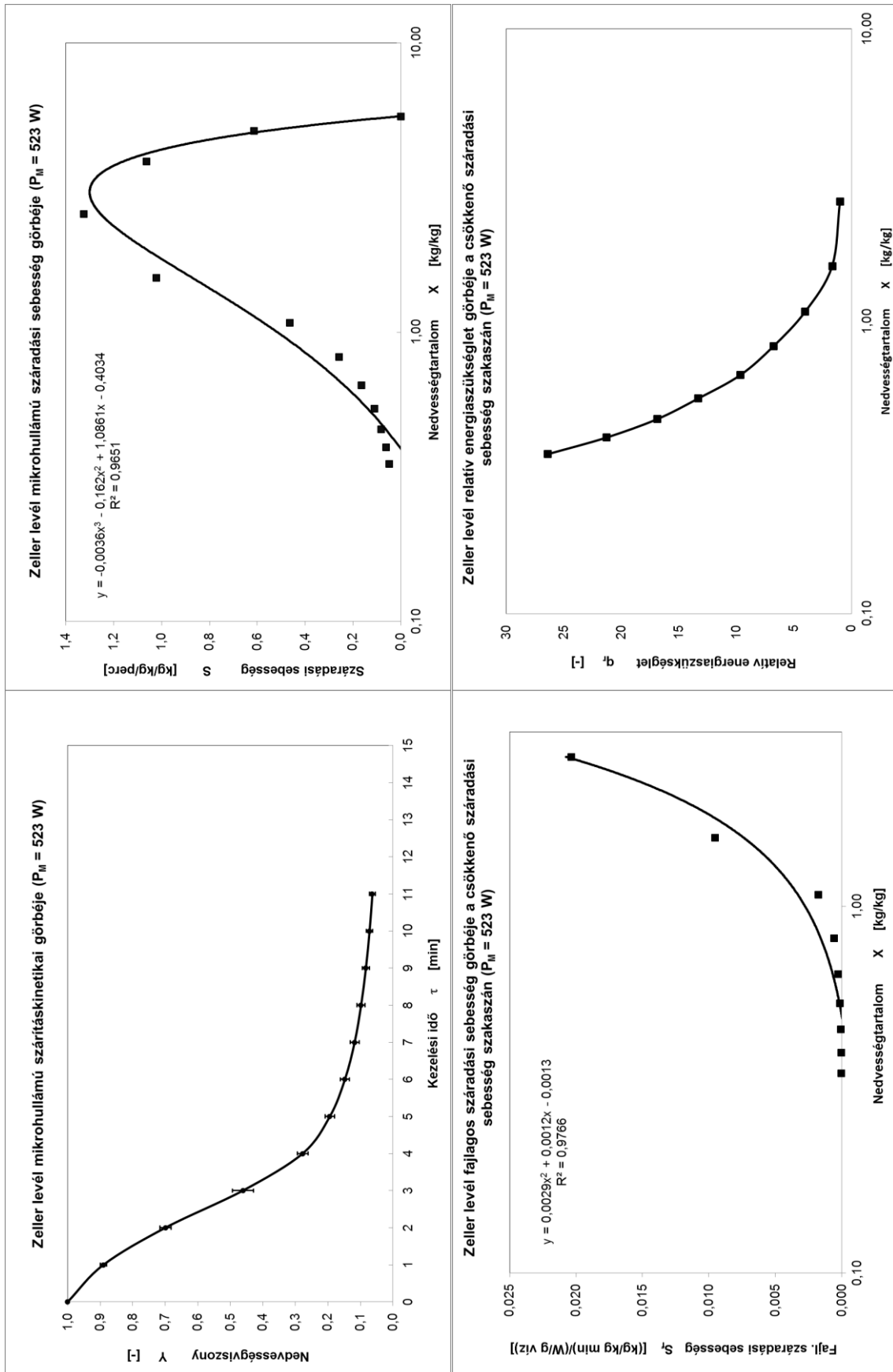
M3.9. A kapor mérések eredményei



M3.10. A petrezselyem levél mérések eredményei



M3.11. A zeller levél mérések eredményei



9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Beke János tanár úrnak, aki hasznos tanácsaival és útmutatásával irányította munkámat, valamint a kutatómunka mellett támogatta és segítette a tudományos közéletben való aktív részvételemet, és publikálási lehetőségeimet. Köszönetet mondok a SZIE Folyamatmérnöki Intézet munkatársainak, akik értékes észrevételeikkel segítették munkámat.

Külön köszönet a Szent István Egyetem Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar, Kertészeti Tanüzem dolgozóinak a méréshez szükséges, mindig friss növényekért.

Végül megköszönöm feleségemnek, szüleimnek és öcsémnek a támogatást és biztatást, valamint a türelmet, amellyel végigkísérték munkámat.