

A kombinált (konvektív előszárítás és fagyasztva utószárítás) vízelvonási eljárás szárítási- és a végtermék fizikai jellemzőinek vizsgálata

Antal Tamás

Nyíregyházi Főiskola Műszaki és Agrártudományi Intézet,
Jármű- és Mezőgazdasági Géptani Tanszék, Nyíregyháza
antalt@nyf.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a tanulmányban a fagyasztva szárítás (FD), a meleg levegős szárítás (HAD) és a kombinált szárítás (HAD-FD) hatását vizsgáltuk a szárítási jellemzőkre, az energia felvételre, a sárgarépa texturájára, a rehidrációjára és a színére. Az eredményeink azt mutatják, hogy a HAD-FD jelentős mértékben javította a szárítási időt, hasonlítva az FD-hez, melyet hasonló körülmények között végeztünk el, ezen kívül a HAD-FD csökkentette teljes szárítási költséget. A szárítási kinetika jellemzését Henderson-Pabis és harmadfokú polinom modellekkel oldottuk meg, a HAD, FD és HAD-FD esetében. A konvektív módszerrel (HAD) szárított sárgarépa zsugorodott, keményedett, alacsony rehidráció és barna színű felület jellemezte. A fagyasztva szárított (FD) sárgarépakockák porózus struktúrával, kiváló visszanedvesedéssel, puha texturával és fakult színnel értékelhetők. A kombinált módszerrel (HAD-FD) szárított minták jobb minőségűek, mint a konvektív szárított (HAD) sárgarépa, illetve megközelítik a fagyasztva (FD) szárított anyag minőségét, figyelembe véve a megjelenést, a rehidrációt és a felületi ellenállást (textura). Végezetül kijelenthetjük, hogy a HAD-FD módszer hatásosan javítja az FD szárítási rátát, azonban a kombinált szárítás kismértékben káros hatással van a termék minőségére.

Kulcsszavak: kombinált szárítás, fagyasztva szárítás, konvektív szárítás, szárítási kinetika, energia-fogyasztás, textura, rehidráció, szín

SUMMARY

In this study, the effects of freeze drying (FD), hot-air drying (HAD) and combined drying (HAD-FD) on drying characteristics, energy uptake, texture, rehydration and color of carrot were investigated. Results showed that HAD-FD significantly improved the drying time compared with FD under the same operating conditions, and the HAD-FD can reduce the total cost of dehydration. The drying kinetics was described by the Henderson-Pabis and the third degree polynomial models in the case of HAD, FD and HAD-FD. The HAD carrot samples were exhibited shrinkage, case hardening, poor rehydration and brown surface. The FD carrot cubes appeared porous structure, excellent rehydration, soft texture and loose color. The HAD-FD samples were superior to HAD products and was nearer in quality to FD products with respect to appearance, rehydration and surface resistance (texture). Finally, it is concluded that HAD-FD is effective in improving the FD drying rate. However, the combined drying has a small-scale adverse effect on product quality.

Keywords: combined drying, freeze drying, convective drying, drying kinetics, energy consumption, texture, rehydration, color

BEVEZETÉS

A sárgarépa népszerű zöldségféle az egész világon, mindez köszönhető a magas tápértékének. A sárgarépában (*Daucus carota* L.) különösen magas az α - és β -karotin, amely nagy A-vitaminforrás az emberi szervezet számára. Továbbá jelentős mennyiségű C, B1, B2, B6 és B12 vitamint, folsavat, káliumot és magnéziumot tartalmaz. Az α - és β -karotin alkotja a karotinok 90–95%-át, ami a sárgarépa narancssárga színéért felelős. A sárgarépának számos jótékony hatása van, gyermekkorban hozzásegít a csontozat és a fogazat fejlődéséhez. Savtalanítja a vért, ezzel elősegíti a máj működését. Hatékony immunserkenő, fokozza a csecsemőmirigy működését. Karotinpótlással javíthatók az immunválaszok, a napi természetes β -karotinbevitel jelentősen növeli a fehérvérsejtek számát, aktivitását, különösen a T-sejteket, melyek csökkenése jellemző rák- és AIDS-betegeknél. Azoknál a népcsoportoknál, amelyek étrendjében sok a karotinoidban gazdag gyümölcs és zöldség, kevesebb a daganatos megbetegedések aránya (Gamboa-Santos et al., 2013; Kaszab, 2013).

A termék minőségét a külső (szín, méret, alak) és belső (íz, illat, állomány, beltartalom, visszanedvesítés) jellemzőinek együttese határozza meg (Abbot, 1999).

A vevőt ezek a fizikai és kémiai tulajdonságok megvizsgálása vezérli a szárítmány megvásárlása előtt.

A sárgarépa romlandó anyag, mert 80–90% nedvességet tartalmaz, és magas enzimaktivitása van, gondolkunk itt a peroxidázra és a lipoxigenázra, melyek hozzájárulnak a sárgarépa rossz ízéhez a tárolás alatt (Lo et al., 2002). Ezért a sárgarépát konzerv, fagyasztott és szárított formában tartósítják (Sutar et al., 2008), a sárgarépa emelett alapanyag a gyümölcslevegekben, instant levesporokban. Ahhoz, hogy meghosszabbítsuk a gyökérzöldségek elérhetőségét a téli hónapokra is, többféle szárítási eljárással tartósíthatjuk, ezek közül a fagyasztva szárítás (FD), más néven a liofilizálás a legkíméletesebb módszer.

A fagyasztva szárítás lényege, hogy a fagyott anyagból a vizet elszublimáltatjuk alacsony nyomáson. A szárítás alatt a folyékony víz jelenlétének elkerülésével a késztermékben a mikrobiológiai reakciók nem jellemzőek és ez által a romlási folyamat nem alakul ki. Magas minőségű terméket állíthatunk elő pl. nyersanyaghoz hasonló texturát, külső megjelenést, magas rehidrációs képességet, alacsony veszteséget a beltartalomtól és az aromától. Ennek ellenére a liofilizálás felhasználása jóformán a gyógyszergyári alkalmazásra terjed ki, ennek oka, hogy magas a berendezés beszerzési ára és az üzemeltetési költsége (Antal, 2013).

Az ipari feldolgozás során a sárgarépat előszeretettel szárítják konvektív – meleg levegős – módszerrel (HAD). A viszonylag magas hőmérséklet (80–90 °C) visszafordíthatatlan károkat okoz a termék ízében, a színében, a rehidrációjában, a beltartalmában és a megjelenésében, ily módon csökken az eladhatósága (Lin et al., 1998). Mindemelett elmondhatjuk, hogy a konvektív szárítás élelmiszeripari alkalmazása elsősorban az alacsony szárítási költség miatt terjedt el.

A kutatómunka során a két ismertetett szárítási eljárást (HAD és FD) összekapcsoltuk – ezt nevezzük kombinált vízelvonásnak – és megvizsgáltuk, hogy milyen hatással van a termék minőségére, a szárítási időre és az energiafelhasználásra. A sárgarépa mintákat először szárítottuk meleg levegővel, elérve a megfelelő anyag-nedvességtartalmakat, majd ezután közvetlenül fagyasztva utószárítottuk. A szárítási procedúrát ezért a konvektív módszerrel (HAD) kezdtük, mert a nedvesség (szabad víz) nagy részét itt eltávolítjuk rövid idő alatt, ezzel meggyorsítva a vízleadást, a minőség nagymértékű vesztesége nélkül. A sárgarépa kockák dehidrációját a liofilizálással (FD) fejeztük be, ennek oka, hogy a termékben lévő maradék nedvességtartalom (kötött víz) eltávolításához kiméletes módszer kell, amely során az anyag szöveteinek roncsolása nélkül megy végbe a teljes vízelvonás. Mujumdar és Beke (2002) megállapítása szerint a szárítás utolsó fázisában a száradási sebesség fokozatosan csökken ennek hatására többszörösére növekszik az energiaigény és a termék beltartalmi értékei csökkennek. Ezért a kombinált vízelvonási módok jelentős része a meleg levegős szárítás utolsó szakaszának kiváltására irányul.

A tanulmány a következő célokat fogalmazta meg: A kombinált szárítási eljárás hatását megvizsgálni a szárítási időre, az energiafogyasztásra, feltételezve azt, hogy kedvezőbb eredményt kapunk a liofilizáláshoz képest. Megfelelő empirikus modellel jellemezni a szárítási kinetikát. Ezen kívül kimutatni műszeres vizsgálatokkal, hogy a kombinált dehidrációs módszerrel kezelt sárgarépa hasonló minőségi paraméterekkel (textúra, rehidráció és szín) rendelkezik, mint a fagyasztva szárított.

Jelen ismereteink szerint a szakirodalomban ilyen jellegű tudományos jelentés nem található.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A nyersanyag

A nyers sárgarépat (*Daucus carota* L.) a Nyíregyházán található zöldségpiacról szereztük be 2013 szeptemberében. A kísérletekben felhasznált mintákat megtisztítottuk bő vízben, késsel hámoztuk, eltávolítottuk a szennyeződések és a hibás részeket. Ezután a mintákat 1 cm-es oldalnagyságú kockákra vágtuk fel. Mindegyik szárítási kísérlet során 200–200 g alapanyagot használtunk fel. A kísérletek reprodukálhatósága miatt a sárgarépakockákat hűtőszekrényben tároltuk -16 °C-on, a felhasználásig.

Szárítási módszerek

A konvektív vagy meleg levegős szárítás (HAD) LP306 típusú hengersizárítóban (Labor MIM, Buda-

pest) történt. A szárító tálcáira (3 db) egy rétegben helyeztük el a sárgarépakockákat. A szárítólevegő hőmérséklete és sebessége 75 °C és 1 m/s volt. A levegő relatív páratartalmára 16–21%-ot mértünk a Testo 4510 típusú mérőkészülék (Testo AG, Németország) segítségével. A mérőműszer érzékelőit (szélsebesség-, hőmérséklet- és páratartalom-mérő szondák) a szárítóberendezés szellőzőcsonkjához helyeztük el.

A viszonylag alacsony szárítóközeg hőmérséklet ($T=75$ °C) alkalmazásának/választásának oka, hogy 70 °C-ról 80 és 90 °C-ra növelve a levegő hőmérsékletét, drasztikusan csökken a szárított sárgarépa rehidrációs képessége, a β -karotin-tartalma és megnövekedik a színdifferencia és a zsugorodás (Hiranvarchat et al., 2011).

A fagyasztva-szárítás (FD) művelete Armfield FT33 (Armfield Ltd., Egyesült Királyság) típusú berendezéssel lett végrehajtva, mely a Nyíregyházi Főiskola Jár-mű és Mezőgazdasági Géptani Tanszék laboratóriumában található. A sárgarépakockák szárítása az alábbi paraméterekkel jellemezhető:

- a minták fagyasztása: -20 °C (a kristályosodási pont alá);
 - a szárítókamra hőmérséklete (a művelet végén): 21 °C;
 - a minták átlaghőmérséklete (a művelet végén): 19 °C;
 - a kondenzátorkamra hőmérséklete (a művelet alatt folyamatosan): -50– -55 °C;
 - a munkakamra nyomása: 75–90 Pa;
 - a nyersanyag tömege: 200 g (JKH-500 típusú digitális mérleggel mérve, Jadever Scale Co., Tajvan).
- A mintatálcára egy rétegben helyeztük el a szárítandó anyagot.

A szárítás alatt lejátszódó folyamatok pontos elemzéséhez a laboratóriumi fagyasztva szárító berendezést elláttuk egy adatgyűjtő rendszerrel. A szárítandó anyag tömegének méréséhez a vákuum alatt lévő henger alakú szárítókamra aljára vastag fémlapok (4 mm) közé szereltük az EMALOG Kft. által gyártott PAB-01 típusú mérleg-cellát. A lemért mintákat a platformcellára helyeztük. Az adatkábel kivezetését pedig a kamra tetejét lezáró akril fedélen keresztül oldottuk meg. A tömegváltozás a külső térben elhelyezett ES-138 típusú mérlegműszerről olvasható le, mely a platformcellától kapja az analóg jeleket. A mérlegműszert RS232 illesztőn keresztül kapcsolatba hoztuk a számítógépre telepített adatgyűjtő szoftverrel (DATPump), ami a mérés értékeit Microsoft Office Excel táblázatban dolgozta fel.

A kombinált szárítás (HAD-FD) kivitelezése két lépésben történt meg. A minták előszárítását hengersizárítóban (HAD) kezdtük el ugyanazon körülmények között, mint a hagyományos konvektív szárításnál ($T=75$ °C, $v=1$ m/s és $\rho=16$ –21%). A minták szárítását a megadott anyag-nedvességtartalomig végeztük el, ezt nevezzük csatlakozási pontnak. Ezután közvetlenül átraktuk az előszárított mintákat a liofilizáló (FD-utószárítás) berendezésbe (hasonló paraméterek mellett, mint az egyfokozatú fagyasztva szárításnál, lásd két bekezdéssel feljebb). A szárítás folyamata a tömegállandóság beálltáig tartott, amit más néven egyensúlyi nedvességtartalomnak nevezünk.

A szárítási kísérleteket háromszori ismétléssel végeztük el, az átlagértékeket jelentettük meg a tanulmányban.

Nedvességtartalom meghatározása

A sárgarépa minták nyers, előszárított és teljesen leszártított nedvességtartalmait Precisa Ha 60 (Precisa Gravimetrics AG, Svájc) típusú gyorsnedvesség-mérővel határoztuk meg. A nyers sárgarépa nedvességtartalma nedves bázisra (w.b.) számolva 88,9%, ez száraz bázisban (d.b.) kifejezve 8,009 kg víz/kg szárazanyag. A minták nedvességtartalmának vizsgálatát háromszori ismétléssel végeztük el, a tanulmányban az átlagértékeket vettük figyelembe.

A szárítási kinetika modellezése

A szárítási folyamat ábrázolásánál általában a száraz bázisban kifejezett nedvességtartalmat (M) használjuk fel, mely az alábbi képlettel számítható:

$$M = \frac{m_t - m_s}{m_s}$$

ahol: M – a minta nedvességtartalma (kg víz/kg száraz anyag), m_t – a minta tömege az adott pillanatban (kg), m_s – a minta száraz tömege (kg).

Az ún. nedvességráta (MR) számítása a következő egyenlet felhasználásával történik:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

ahol: MR – a minta nedvességrátája (dimenzió nélküli), M_e – az egyensúlyi nedvességtartalom (kg víz/kg száraz anyag), M_0 – az anyag nyers nedvességtartalma (kg víz/kg száraz anyag), M – a minta nedvességtartalma az adott pillanatban (kg víz/kg száraz anyag).

A konvektív- és a fagyasztva szárítás nedvességleadási görbéit empirikus, vékonyrétegű matematikai modellekkel közelítettük, az alkalmazott modellek egyenleteit az 1. táblázatban követhetjük nyomon.

1. táblázat

A szárítási görbékre illesztett empirikus modellek

Modell megnevezése(1)	Modell egyenlete(2)	Referenciák(3)
Henderson és Pabis vagy Exponenciális(4)	$MR = a \cdot e^{-kt}$	Akgun és Doymaz (2005)
Harmadfokú polinomiális(5)	$MR = at^3 + bt^2 + ct + d$	Antal et al. (2011)

Megjegyzés: a – model konstans, k – szárítási konstans (h^{-1}), t – szárítási idő (h). a , b , c , d – a harmadfokú polinom állandó együtthatói, melyek értékei az anyag jellemzőitől függenek: a fajtától, az érettségtől, a fagyasztási sebességtől és a vízleadási hajlandóságtól, t – a szárítási idő (h)

Table 1: The empirical models fitted on drying curves

Model name(1), Model equation(2), References(3), Henderson and Pabis or Exponential(4), Third-degree polynomial(5), Note: a – model constant, k – drying constant (h^{-1}), t – drying time (h). a , b , c , d – the third-degree polynomial depend on the characteristics of the material, including variety, ripeness, freezing rate, and tendency to lose water, t – drying time (h)

Az exponenciális és polinomiális függvénykapcsolat becslését korrelációs koefficienssel (R^2) és relatív átlagos négyzetes hibával (RMSE) végeztük el. Az R^2 értéke 0 és 1 között található, amennyiben a görbeillesztés pontos, akkor az R^2 értéke az 1-hez közelít. A korrelációs koefficiens kiszámítása a Microsoft Office Excel programmal történt. Az RMSE értéke a következő egyenlet alkalmazásával számolható:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{mért_i} - MR_{becsült_i})^2}{N}}$$

ahol MR – a minta nedvességrátája (dimenzió nélküli), i – az i -edik mért és becsült érték, N – a minta-szám.

Minél kisebb az RMSE érték, azt jelzi, hogy annál pontosabb a görbeillesztés.

Energiafogyasztás mérése

A szárítási kísérletek során felhasznált berendezések elektromos energia-fogyasztását az alábbi képlet segítségével számoltuk ki:

$$E = P \times t$$

ahol: E – villamos energia-fogyasztás (kWh), P – berendezés energiaigénye (kW), t – szárítási idő (HAD, FD és HAD-FD esetében).

A szárítóberendezések energia-felvételét EKM 265 típusú fogyasztásmérővel (Conrad Electronic GmbH, Németország) mértük, oly módon, hogy a konnektor és a gép dugvillája közé helyeztük el a mérőkészüléket.

Állomány műszeres vizsgálata

A nyers és a szárított sárgarépa minták állományvizsgálata, vagy más néven textura elemzése Brookfield CT3-4500 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Egyesült Államok) típusú keménységmérővel volt meghatározva. Roncsolásmentes felületi keménységmérés módszerét vagy más néven kompressziós vizsgálati eljárást alkalmaztunk. A kompressziós vizsgálat azt jelenti, hogy egy nyomófejet nyomunk az anyagba, miközben mérjük az erőt és a deformációt. Newtonban (N) kifejezve kaptuk meg a termék ellenállását a nyomófejjel szemben.

A keménységmérő berendezést az alábbi specifikációkkal üzemeltettük: a terhelési tartomány 0–10 g, a munkasebesség 1 mm/s, a próbafaj átmérője 4 mm, a próbafaj haladási távolsága 50 mm, a penetráció maximális értéke az anyagban 2 mm. A vizsgálatokat minden kezelési eljárás esetében hat alkalommal végeztük el, és az átlagértékeket prezentáltuk ebben a cikkben.

Visszanedvesítés vizsgálata

A kísérlet lépései a következőképpen alakultak: először lemértük a szárított minták tömegét, mindegyik minta tömege 0,5 g ($\pm 0,1$) körüli értéket vett fel, majd ezeket a mintákat 25 °C-os (± 1 °C) desztillált vízbe merítettük és 120 percen keresztül nedvesítettük. Mindegyik edénybe 200 ml desztillált vizet öntöttünk, melynek hőmérsékletét folyamatosan mértük Testoterm 4510 (Testo AG., Németország) típusú készülék hőmérsékletmérőjével (NiCrNi). A vízből kivett nedves mintákról nedvszívó réteg segítségével a felesleges folyadékot eltávolítottuk és a kísérlet végén lemértük a rehidratált anyag tömegét. A visszanedvesítési kísérleteket háromszori ismétléssel végeztük el.

A rehidrációs ráta (RR) meghatározása az alábbi képlet alkalmazásával történik Duan et al. (2010) szerint:

$$RR = \frac{m_{re}}{m_{sz}}$$

ahol: RR – rehidrációs ráta (dimenzió nélküli), m_{re} – rehidratált minta tömege (g), m_{sz} – szárított minta tömege (g).

Színmérés

A nyersanyag és a dehidrált minták színmérése CIE $L^*a^*b^*$ rendszerben történt, ColorLite sph900 típusú mobil spektrofotométerrel (ColorLite GmbH, Németország). A kísérletek során fehér etalonnal történő kalibrálást követően az sárgarépakockák felületén véletlenszerűen mértük a színjellemzőket. A műszeren beállítható a mérések ismétlésszámának gyakorisága (jelen esetben háromszoros), amelyből a műszer átlagot számol, és generálja a végső értéket.

Az szárítás hatása a termék színére ún. színdifferencia által volt meghatározva:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2}$$

ahol: ΔE – színkülönbség, L^* – világossági koordináta, a^* – pirossági koordináta, b^* – sárgasági koordináta. A „0” felírat a nyersanyag paramétereit jelenti, azaz ebben az esetben ez a kontroll.

Statisztika

Az adatokat PC felhasználásával, Microsoft Office Excel 2010 táblázatkezelő programban rögzítettük és dolgoztuk fel. További statisztikai elemzést, ún. egyutas varianciaanalízissel, SPSS Statistics 21 (IBM, USA) szoftver segítségével végeztünk, kimutatva azt, hogy van-e szignifikáns különbség a szárítási eljárásokkal kezelt minták minősége között.

EREDMÉNYEK

A kombinált vízelvonás hatása a szárítási kinetikára

A szárítási kísérletek során az egyik legfontosabb feladat a szárítási görbék felvétele (az anyag nedvességtartalmának változása az idő függvényében). Az 1. ábrán megfigyelhető a konvektív- (HAD), fagyasztva- (FD) és a kétfokozatú konvektív elő- és fagyasztva utószárítás (HAD-FD) nedvesség-leadási görbéi. A diagramon található pontok prezentálják a kísérleti adatokat, a pontokra illesztett görbék pedig az empirikus modellek lefutását jelölik. Ezek mellett az 1. ábrán fel lett tüntetve a kétfokozatú szárítás csatlakozási pontjai (MR=0,44; 0,26 és 0,15 nedvességtartalmi értékeknél) is, ez azt jelenti, hogy a sárgarépakockák 2, 3 és 4 órát száradtak a konvektív hengersizárítóban, utána közvetlenül áthelyeztük azokat a fagyasztva szárító berendezésbe. A sárgarépakockák vízelvonása a tömeg-kiegyenlítőedéig tartott, azaz az egyensúlyi nedvességtartalom beálltáig.

1. ábra: A fagyasztva-, konvektív- és kombinált dehidráls szárítási görbéi és a görbékre illesztett modellek

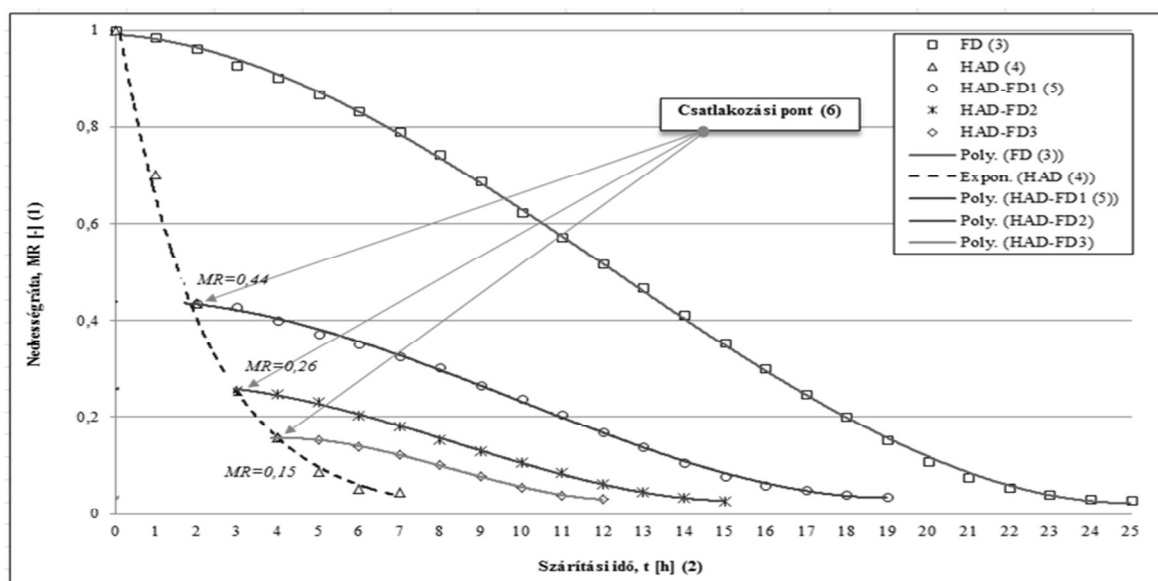


Figure 1: The drying curve of freeze-, convective- and combined dehydration and fitted models on the curves Moisture ratio(1), Drying time(2), Freeze drying(3), Hot-air drying(4), Combined drying(5), Converting point(6)

A 2. táblázatban összegeztük a szárítási görbékre illesztett empirikus ún. vékonyrétegű modellek szárítási konstansait és az illesztés pontosságát jelölő statisztikai mutatók értékeit. A statisztikai elemzésekből (R^2 és RMSE) kiderül, hogy a szárítási kinetika modellezésére hivatott modellek megfelelőek, mivel mind a harmadfokú polinom és a Henderson-Pabis (exponenciális) egyenletek korrelációs koefficiens (R^2) értékei 0,99 felett volt. A relatív átlagos négyzetes hiba (RMSE) értékei 0,005423–0,028494 közötti, ami szintén mutatja, hogy a szárítási görbék illesztése jól sikerült, ez különösen igaz a polinomiális modellre. Összegezve a matematikai modellek statisztikai kiértékelését, elmondhatjuk, hogy alkalmasak a konvektív-, fagyasztva- és kombinált dehidráls szárítási görbéinek közelítésére.

A 3. táblázat ismerteti számunkra a különböző szárítási eljárások üzemeltetési idejét a sárgarépa esetében, ezek mellett feltüntettük a szárítmány nedvességtartalmát a szárítási folyamat végén, illetve azt is, hogy a kombinált vízelvonási módszerrel mekkora a megtakarítás a liofilizálás kezelési idejéhez képest, a csatlakozási pontok függvényében.

A vizsgálat eredményei azt mutatják – ahogy azt vártuk –, hogy a legrövidebb működési időt a konvektív szárítás (HAD), a leghosszabb működési időt pedig a liofilizálás (FD) produkálta, 7 és 25 órával. Ezek mellett érdemes megemlíteni, hogy a kombinált módszerek (HAD-FD1, 2, 3) szignifikánsan javították a kezelési időt a fagyasztva szárításhoz (FD) képest. A 4 órás előszárítás a konvektív hengerekben és a 8 órás utószárítás a fagyasztva szárítóban, mintegy 52%-kal csökkentette a liofilizálás szárítási idejét, mely igen figyelemre méltó, viszont itt nem szabad elfeledkezni a termék minőségéről (később ezzel foglalkozunk).

A szárítási folyamatok (HAD, FD és HAD-FD) végén a késztermékek nedvességtartalmai, mind nedves és száraz bázisra vonatkoztatva azt mutatják, hogy nagy eltérés nem volt az eljárások között.

A fagyasztva szárított (FD) sárgarépa szárítási idejét tekintve – 25 h – hasonló eredményt ért el Cui et al. (2008). A kínai tudóscsoport a szeletelt sárgarépa mintákat 88,2%-ról 7%-os nedvességtartalomra szárították le, a következő beállítások mellett: fagyasztás $-25\text{ }^\circ\text{C}$ -ig, kamra hőmérséklet $30\text{ }^\circ\text{C}$ és nyomás 200 Pa.

2. táblázat

Az empirikus modellek paraméterei és statisztikai kiértékelése

Szárítási módszerek(1)	Modell(2)	Modell paraméterei(3)					Statisztika(4)	
		k	a	b	c	d	R^2	RMSE
FD	Polinomiális(5)	-	0,0001	-0,0046	0,0032	1	0,9997	0,005423
HAD	Exponenciális(6)	0,477	1,6990	-	-	-	0,9917	0,028494
HAD-FD1	Exponenciális és polinomiális(7)	-	0,0001	-0,0034	-0,0025	0,4389	0,9990	0,012859
HAD-FD2		-	0,0002	-0,0034	-0,0041	0,2650	0,9990	0,012719
HAD-FD3		-	0,0004	-0,0070	0,0143	0,1476	0,9997	0,005512

Table 2: Parameters of empirical models and statistical evaluation

Drying methods(1), Model(2) Model parameters(3), Statistica(4), Polynomial(5), Exponential(6) Exponential and Polynomial(7)

3. táblázat

A szárítási eljárások hatása a nedvességtartalomra és a szárítási időre

Szárítási módszerek(1)	Konvektív szárítási idő (h)(2)	Fagyasztva szárítási idő (h)(3)	A szárítmány nedvességtartalma (% , w.b. és d.b)(4)		Teljes szárítási idő (h)(5)	Megtakarítás a szárítási időben (%) (6)
FD	-	25	7,12	0,235	25 ^c	-
HAD	7	-	8,22	0,365	7 ^a	-
HAD-FD1	2	17	7,62	0,284	19 ^d	24 ^c
HAD-FD2	3	12	6,94	0,222	15 ^c	40 ^b
HAD-FD3	4	8	7,34	0,249	12 ^b	52 ^a

Megjegyzés: ^{abc} feliratok jelzik a szignifikáns különbséget, oszloponként, $p \leq 0,05$.

Table 3: Effect of drying methods on the moisture content and the drying time

Drying methods(1), Convective drying time(2), Freeze drying time(3), Moisture content of dried material(4), Total drying time(5), Savings in drying time(6), Note: ^{abc} different letters in the same column indicate a significant difference, $p \leq 0.05$

A szárítási eljárások energiafelvétele

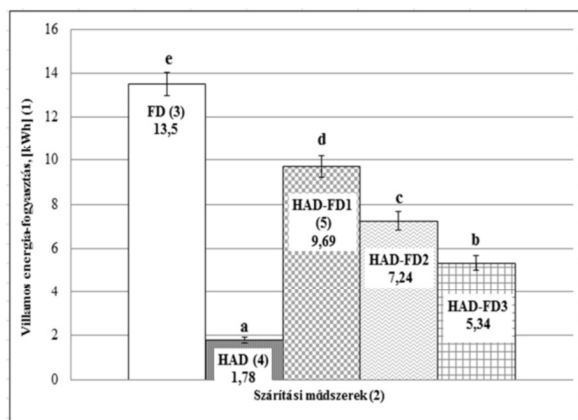
A zöldség- és gyümölcszsárítás magas energiafogyasztással rendelkezik és költséges eljárás az élelmiszeripar számára, ezért elengedhetetlen, hogy amennyire lehetséges mérsékeljük az energiára fordított költségeket. A 2. ábra reprezentálja a kísérletbe bevont szárítási eljárások energia-felvételét, mely számszerű-

en meg lett jelenítve az oszlopokon, illetve a szignifikáns eltéréseket is megfigyelhetjük ugyanott.

A szárítási módszerek működési idejéhez hasonlóan a liofilizálás (FD) energiafogyasztása a legmagasabb értékű, míg a konvektív módszer (HAD) energiafelvétele töredék ennek. A fagyasztva szárítás 7,6-szorosra a meleg levegős szárítás villamos energiafogyasztásának. A kombinált vízelvonási eljárások (HAD-FD1,

2 és 3) is szignifikáns hatással voltak a liofilizálás energia-felvételére. A legkedvezőbb értékkel a HAD-FD3 rendelkezik, ez 5,34 kWh, 200 g termék leszártására vonatkoztatva, ami 60,44%-os csökkenést jelent a FD energiafogyasztásához képest. A HAD-FD1 és a HAD-FD2 módszereknek 28,22 és 46,37%-kal kevesebb az energiafelvétele a fagyasztva szártáshoz viszonyítva.

2. ábra: A szártási eljárások energiafogyasztása



Megjegyzés: abc az oszlopok felett található különböző feliratok jelzik a szignifikáns különbséget, $p \leq 0,05$.

Figure 2: Energy consumption of drying methods

Electricity consumption(1), Drying methods(2), Freeze drying(3), Hot-air drying(4), Combined drying(5), Note: abc different letters in the same column indicate a significant difference, $p \leq 0,05$

A kombinált szártás hatása a végtermék fizikai tulajdonságaira

Ebben a fejezetben a konvektív-(HAD), fagyasztva-(FD) és ezek kombinálásával szártott (HAD-FD) késztermék allomány-, rehidrációs- és külső megjelenés vizsgálatainak eredményeit kívánjuk közölni.

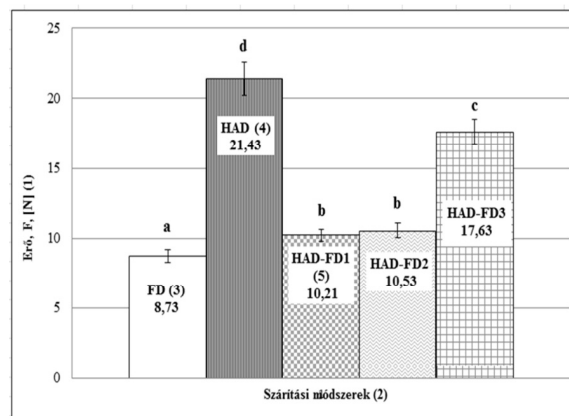
Az élelmiszeripar által elkészített termékek esetében az egyik legfontosabb fizikai jellemző a keménység. A keménység, mint minőségi jellemző segítségével következtetni tudunk az állagra. A 3. ábrán láthatjuk a különböző módszerrel dehidrált sárgarépakockák állományvizsgálatának vagy más néven texturájának, keménységének mérési eredményeit. A oszlopokon megtalálhatóak a felületi ellenállás értékek és a szignifikáns eltérések is. A texturális vizsgálatokból megállapíthatjuk, hogy a legalacsonyabb értékkel a liofilizált (FD=8,73N) minta rendelkezik, a legkeményebb felülettel pedig a meleg levegővel (HAD=21,43N) szártott sárgarépa.

Cui et al. (2008) kimutatták, hogy a liofilizált (FD) és a konvektív módszerrel (HAD) szártott sárgarépa ellenállása 50 g és 420 g volt, mindez azt mutatja, hogy a meleg levegő hatására zsugorodik az anyag, sejttömésedés történik és keményedik a textúra.

A konvektív elő- és fagyasztva utószártott (HAD-FD1, 2, 3) sárgarépaminták magasabb értékű felületi ellenállással rendelkeznek, mint a liofilizált (FD) minták, mindez szignifikánsan is kimutatható. A kombinált módszerrel szártott minták texturájának értéke függ attól, hogy a száradó anyag mennyi időt tölt a konvektív szártóban. Ennek fényében a HAD-FD1 (konvektív előszártás: 2 h), a HAD-FD2 (konvektív előszártás:

3 h) és a HAD-FD3 (konvektív előszártás: 4 h) eljárásokkal dehidrált sárgarépa 10,21 N; 10,53 N és 17,63 N felületi ellenállással rendelkeznek. Mindezt figyelembe véve, ezek a minták 14,5; 17,1 és 50,48%-kal keményebb felülettel jellemezhetőek, mint a fagyasztva szártott (FD). Bár meg kell jegyezni, hogy a HAD-FD1 és a HAD-FD2 módszerekkel szártott minták között szignifikáns eltérés nem volt.

3. ábra: Különböző szártási módszerek hatása a termék texturájára

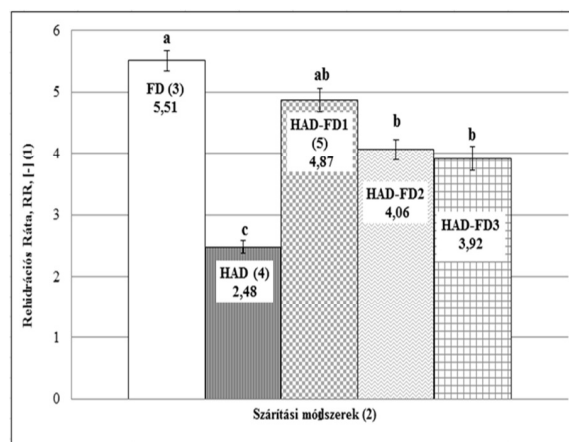


Megjegyzés: abc az oszlopok felett található különböző feliratok jelzik a szignifikáns különbséget, $p \leq 0,05$.

Figure 3: Effect of different drying methods on texture of product Force(1), Drying methods(2), Freeze drying(3), Hot-air drying(4), Combined drying(5), Note: abc different letters in the same column indicate a significant difference, $p \leq 0,05$

A háromféle szártási eljárással kezelt sárgarépa minták visszanedvesítése vagy rehidrációja a 4. ábrán kísérhető figyelemmel. Az ábrán az előzőekhez hasonlóan feltüntettük a visszanedvesítési értékeket és a szignifikancia szinteket is.

4. ábra: Különböző szártási módszerek hatása a késztermék visszanedvesítésére



Megjegyzés: abc az oszlopok felett található különböző feliratok jelzik a szignifikáns különbséget, $p \leq 0,05$.

Figure 4: Effect of various drying methods on rehydration of product

Rehydration Ratio(1), Drying methods(2), Freeze drying(3), Hot-air drying(4), Combined drying(5), Note: abc different letters in the same column indicate a significant difference, $p \leq 0,05$

Az elvárásoknak megfelelően sikerült a liofilizált (FD=5,51) sárgarépakockák rehidrációja, mintegy 2,22-szer több vizet szívott magába, mint a meleg levegővel (HAD=2,48) szárított minta.

Lin et al. (1998) kimutatta, hogy a fagyasztva szárított (FD) minták 25 °C-os nedvesítő közegben 120 perc nedvesítés után a rehidrációs ráta (RR) értéke 8 volt, míg a meleg levegővel szárított (HAD, a szárító levegő hőmérséklete: 70 °C) RR=5 volt. Az eredményeinkhez hasonlóan a FD magasabb rehidrációs ráta értékkel rendelkezik, mint a HAD, mindez köszönhető a liofilizált termék likacsos struktúrájának, mikro üregeknek, mely vízfelvételnél úgy viselkedik, mint a szivacs (Schoof et al., 2001).

A kombinált módszereknél megfigyelhető az alacsonyabb értékű rehidrációs hajlam, mindez lineáris kapcsolatban van a konvektív szárítóban töltött kezelési idő növekedésével. Ennek függvényében a HAD-FD1, HAD-FD2 és a HAD-FD3 minták RR értékei sorra: 4,87; 4,06 és 3,92, mely értékek 11,6; 26,3 és 28,85%-kal alacsonyabbak, mint a liofilizált minták RR értékei. Ezen kívül itt ki kell emelni, hogy a FD és a HAD-FD1, illetve a HAD-FD1, HAD-FD2 és a HAD-FD3 által kezelt minták rehidrációs ráta értékei között nem volt szignifikáns különbség.

A szín vagy a külső megjelenés az élelmiszeriparban felhasználásra kerülő termék értékmérője. A feldolgozási folyamat során a vizsgálat alá vont termék színe sokat változhat. Ez igaz a sárgarépa szárítására is. A nyersanyag L_0^* , a_0^* és b_0^* paramétereire a következőket mértük: 59,6; 22,3 és 49,8 (4. táblázat).

4. táblázat

A különböző szárítási módszerek hatása a termék színkoordinátáira

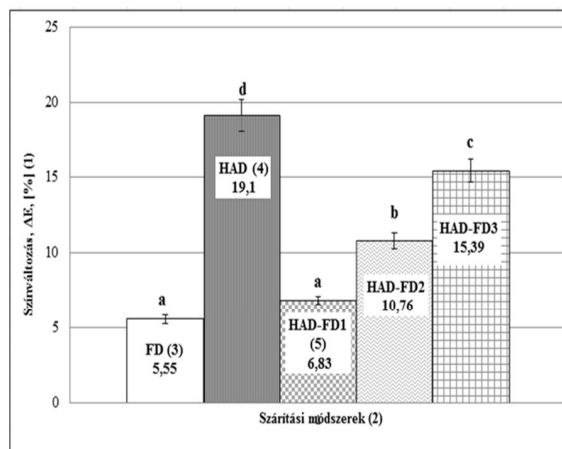
Szárítási eljárások(1)	CIElab színkoordináták(2)		
	L	a	b
Nyersanyag(3)	59,6	22,3	49,8
FD	63,8	20,4	46,7
HAD	43,8	16,3	40,9
HAD-FD1	55,2	19,2	45,6
HAD-FD2	51,1	18,5	44,4
HADFD3	46,2	18,1	43,5

Table 4: Effect of various drying methods on color-coordinate of product

Drying procedures(1), CIElab color-coordinates(2), Raw material(3)

Wagner és Warthesen (1995) kimutatták, hogy az a^* és b^* színkoordináták összefüggésben vannak termékben lévő karotin-tartalommal. Ezek szerint ha csökkennek a fent említett paraméterek értékei a termékben, akkor nagy valószínűséggel az alfa-karotinok és béta-karotinok értéke is csökken az adott szárítási eljárásnál. A fagyasztva szárított (FD) mintáknál az L^* színérték 59,6-ról 63,8-ra emelkedett – azaz fakult, az a^* paraméter (sárga szín) pedig kismértékben csökkent: 22,3-ról 20,4-re, ugyanígy a b^* paraméter is 49,8-ról 46,7-re. Mindezen eredményekből jól látszik, hogy a liofilizálás leginkább az L^* színértékre van negatív hatással, mely a fagyasztás miatt következik be, és egyúttal megállapíthatjuk, hogy a $\Delta E=5,55$ eltéréssel, a legkisebb mértékű színváltozást kaptuk (5. ábra).

5. ábra: Különböző szárítási eljárások hatása a termék színváltozására



Megjegyzés: ^{abc} az oszlopok felett található különböző feliratok jelzik a szignifikáns különbséget, $p \leq 0,05$.

Figure 5: Effect of various drying methods on total color change of product

Total color change(1), Drying methods(2), Freeze drying(3), Hot-air drying(4), Combined drying(5), Note: ^{abc} different letters in the same column indicate a significant difference, $p \leq 0,05$

A konvektív módszerrel (HAD) szárított mintáknál tapasztaltuk a legnagyobb eltérést a nyersanyaghoz képest, mintegy $\Delta E=19,1$ eltérést. Ennek oka, hogy az összes CIElab rendszerben lévő paraméterek értéke drasztikusan csökkent, Howard et al. (1996) szerint ez az eljárásra jellemző magas hőmérsékletnek köszönhető, melynek hatására a szín sötétedik.

Számunkra érdekes még a kétfokozatú szárítás (HAD-FD) hatása a sárgarépa színkoordinátáira. Mindegyik esetében elmondható, hogy a konvektív szárítóban töltött idő lényegesen – szignifikánsan – befolyásolta a totál színdifferencia értékeit (ΔE), kivéve a HAD-FD1 terméknél. Oly módon, hogy a HAD-FD1, HAD-FD2 és a HAD-FD3 ΔE értékei az alábbiak szerint alakultak: 6,83; 10,76 és 15,39. Ennek oka, hogy a konvektív előszárítási idő növekedésével 2–3–4 h, az L^* színkoordináta értéke 55,2; 51,1 és 46,2-re csökkent, ehhez hasonlóan az a^* és b^* koordináták értékei is negatív változásokon mentek keresztül (4. táblázat).

KÖVETKEZTETÉSEK

Ebben a tanulmányban a fagyasztva- és ún. kombinált szárítás (HAD-FD: konvektív előszárítás és fagyasztva utószárítás) összehasonlító vizsgálatát végeztük el, a vizsgálat tárgyát a szárítási idő, az energiafogyasztás, a sárgarépa szárítvány rehidrációja, állománya és külső megjelenése képezte. Emellett a szárítási kinetika modellezését is végrehajtottuk.

A kombinált módszer esetében a konvektív előszárítás ideje 2, 3 és 4 óra volt, ezt követte a liofilizálás 17, 12 és 8 órás üzemeltetési idővel. Ezek közül a legkedvezőbb szárítási idővel és energiafogyasztással a HAD-FD3 kombinációja rendelkezik (4 órás konvektív előszárítás és 8 órás utószárítás a fagyasztva szárítóban). A fizikai jellemzőket tekintve a HAD-FD1 (2 órás előszárítás a konvektív szárítóban, ezután a liofilizálás követte 17 órás szárítási idővel) módszerrel elől-

lított sárgarépa szárítvány megközelítette a fagyasztva szárított (FD) sárgarépa minőségét. Szignifikáns eltérés a két módszer között csak a texturális eredményeknél volt kimutatható. Mindezen eredményeket figyelembe véve, a HAD-FD3 60,44%-kal csökkentette a FD energiafelvételt, de a késztermék minősége a kombinált módszerek közül a leggyengébb volt, ezzel ellentétben a HAD-FD1 termék kiválónak mondható, viszont a fagyasztva szárítás energiafogyasztását mindösszesen 28,22%-kal minimalizálta.

A sárgarépa minőségi és kedvező költségű szárítására a HAD-FD1 vagy a HAD-FD2 (15 órás szárítási idő) kombinált eljárás alkalmazását javasoljuk.

A konvektív-, fagyasztva- és kombinált vízelvonási eljárások szárítási görbéi exponenciális (Henderson és

Pabis) és harmadfokú polinom matematikai modellekkel pontosan lekövethető, mindezt a statisztikai kiértékelésre használt mutatók ($R^2=0,9917-0,9997$, RMSE: $0,005423-0,028494$) is alátámasztják.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- Abbot, J. A. (1999): Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. 15. 3: 207–225.
- Akgun, N. A.–Doymaz, Y. (2005): Modeling of olive cake thin layer drying process. *Journal of Food Engineering*. 68: 455–461.
- Antal, T.–Figiel, A.–Kerekes B.–Sikolya, L. (2011): Effect of drying methods on the quality of the essential oil of spearmint leaves (*Mentha spicata* L.). *Drying Technology*. 29. 15: 1836–1844.
- Antal T (2013): Az előkezelések hatása a fagyasztva szárított Jonagold alma minőségére és a szárítási kinetikájára. *Acta Agronomica Óvariensis*. 55. 1: 23–38.
- Cui, Z. W.–Li, C. Y.–Song, C. F.–Song, Y. (2008): Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology*. 26: 1517–1523.
- Duan, X.–Zhang, M.–Mujumdar, A. S.–Wang, S. (2010): Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *Journal of Food Engineering*. 96: 491–497.
- Gamboa-Santos, J.–Soria, A. C.–Villamiel, M.–Montilla, A. (2013): Quality parameters in convective dehydrated carrots blanched by ultrasound and conventional treatment. *Food Chemistry*. 141: 616–624.
- Hiranvarachat, B.–Devahastin, S.–Chiewchan, N. (2011): Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*. 89: 116–127.
- Howard, L. R.–Braswell, D. D.–Aselage, J. (1996): Chemical composition and color of strained carrots as affected by processing. *Journal of Food Science*. 61: 327–330.
- Kaszab T. (2013): Sárgarépa (*Daucus carota* subsp. sativus) fizikai és ízjellemzőinek változása nem ideális tárolás során. Doktori értekezés. Corvinus Egyetem. Budapest. 9–10.
- Lin, T. M.–Durance, T. D.–Scaman, C. H. (1998): Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*. 31. 2: 111–117.
- Lo, C. M.–Grün, I. U.–Taylor, T. A.–Kramer, H.–Fernando, L. N. (2002): Blanching effects on the chemical composition and the cellular distribution of pectins in carrots. *Journal of Food Science*. 67. 9: 3321–3328.
- Mujumdar, A. S.–Beke J. (2002): Gyakorlati szárítás. Szaktudás Kiadó Ház. Budapest. 35.
- Schoof, H.–Apel, J.–Heschel, I.–Rau, G. (2001): Control of pore structure and size in freeze-dried collagen sponges. *Journal of Biomedical Materials Research*. 58. 4: 352–357.
- Sutar, P. P.–Prasad, S.–Sutar, N.–Thorat, B. N. (2008): Effect of microwave power density and pressure on selected quality parameters of dehydrated carrots. 16th International Drying Symposium. Hyderabad. India. 9–12 November, 2008. 835–842.
- Wagner, L. A.–Warthesen, J. J. (1995): Stability of spray-dried encapsulated carrot carotenes. *Journal of Food Science*. 60: 1048–1053.