بهينه‌سازي خشک کردن اسمزي هويج با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

مينا کارگزاري[۱]، زهرا امام جمعه[۲]*و سهراب معيني[۳]
[۱]دانشجوي دوره‌ي دکتري، [۲] استاد و [۳] دانشيار
دانشکده‌ي مهندسي و فناوري کشاورزي، دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۹/۹/۲۲- تاريخ تصويب: ۱۳۹۰/۸/۳)

چکيده

روش سطح پاسخ به منظور تعيين نقاط بهينه‌ي فرآيند خشک کردن اسمزي، جهت دستيابي به بيشينه‌ي کاهش محتواي رطوبتي ماده‌ي غذايي، کاهش وزن و همچنين کمينه‌ي جذب مواد جامد از محلول اسمزي و فعاليت آبي طي خشک کردن اسمزي قطعات مکعبي شکل هويج مورد استفاده قرار گرفت. درجه حرارت (۵۰-۳۰°C)، مدت زمان فرآيند (۲۴۰- ۱۲۰ دقيقه)، غلظت شربت گلوکز با معادل دکستروز ۴۲ (۵۰-۳۰% وزني/وزني) و غلظت نمک (۱۵- ۵% وزني/وزني)، فاکتورهايي بودند که تأثير آنها بر متغيرهاي وابسته طي خشک کردن اسمزي مورد ارزيابي قرار گرفت. آزمايش‌ها بر اساس طرح کامپوزيت مرکزي با در نظر گرفتن سه سطح شامل نقاط مرکزي و محوري براي هر يک از فاکتورهاي ياد شده، انجام شد. در آزمايش‌هاي انجام شده دور همزني برابر ۲۰۰ دور در دقيقه و نسبت محلول اسمزي به نمونه ۱۰ به ۱ وزني/ وزني در نظر گرفته شد. نتايج به دست آمده حاکي از اين بود که تأثيرات خطي و درجه دوم هر چهار متغير مستقل دما، زمان، غلظت شربت گلوکز و غلظت نمک بر کاهش محتواي رطوبتي ماده‌ي غذايي، کاهش وزن، جذب مواد جامد از محلول اسمزي و فعاليت آبي معني‌دار بود ($p < ۰/۰۰۱$). براي هر پاسخ با استفاده از تجزيه رگرسيون خطي چندگانه، مدل‌هاي چند جمله‌اي درجه‌ي دوم به دست آمد. تجزيه واريانس (ANOVA) به منظور ارزيابي صحت و دقت مدل‌هاي به دست آمده اجرا گرديد. شرايط بهينه فرآيند، در دماي ۳۰°C، زمان ۲۲۷/۱۱۹ دقيقه، غلظت شربت گلوکز ۴۳/۳۱۵ و غلظت نمک ۵% براي دستيابي به WL ۶۶/۹۷ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه) ، SG ۴/۴۷۵ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه)، WR ۶۲/۵۲ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه) و a_w ۰/۷۸۹ مشخص شد.

واژه‌هاي کليدي: خشک کردن اسمزي، هويج، بهينه‌سازي، محتواي رطوبت، روش سطح پاسخ.

مقدمه

هويج *(Daucus carota L.)* به خاطر خواص تغذيه‌اي، محتواي کاروتن و کاروتنوئيدها و نيز مقادير قابل توجه ويتامين‌هاي B_1، B_2، B_6 و B_{12} و عناصر معدني، يک سبزي شناخته شده است. براي افزايش ماندگاري مواد غذايي، شيوه‌هاي متعددي از قبيل تخمير، ترشي کردن، کنسرو کردن، نگهداري در دماي پائين و خشک کردن انجمادي وجود دارد که در اين ميان محصولات فرآيند شده به روش خشک کردن انجمادي بالاترين کيفيت را دارند؛ اما اين روش نگهداري هزينه‌هاي بالايي را به همراه دارد (Gupta et al., 2007). بنابراين نياز به فرآيندهاي نگهداري ساده و ارزان که از لحاظ مصرف انرژي و هزينه‌هاي سرمايه‌گذاري مقرون به صرفه باشند، وجود خواهد داشت تا محصولات فسادپذير غذايي با هزينه‌ي پائين در مناطق دور از منطقه‌ي توليد و همچنين در فصول غيرتوليدي در دسترس باشند. خشک کردن اسمزي يکي از اين شيوه‌هاي فرآيند است (Shi et al., 2003). اين روش خشک کردن يکي از راه‌هاي حذف رطوبت از ماده‌ي غذايي است که در آن مولکول‌هاي آب براي آزادسازي از محصول نيازي به گذر از مرحله‌ي تغيير فاز ندارند. برخي از فوايد استفاده از اسمز مستقيم در مقايسه با ساير روش‌هاي خشک کردن عبارتند از: کاهش تخريب رنگ، عطر و طعم و تغيير رنگ کمتر ميوه در اثر قهوه‌اي شدن آنزيمي (Saurel et al., 1994; Krokida et al., 2001). از طرفي مقدار آب حذف شده از نمونه‌هاي غذايي محدود بوده، به منظور دستيابي به سطوح مطلوب رطوبتي در محصول نهايي غوطه‌ورسازي بلند مدت مورد نياز خواهد بود. محلول اسمزي بايستي a_w پاييني داشته و همچنين اجزاي آن بايد بي‌زيان بوده و مزه‌ي مناسبي داشته باشند. عوامل تأثيرگذار بر فرآيند اسمز عبارتند از: نوع ماده‌ي اسمزي مورد استفاده، غلظت و دماي محلول اسمزي، نسبت محلول به ماده‌ي غذايي و خواص فيزيکوشيميايي ماده‌ي غذايي (Ainsworth et al.,

* نويسنده مسئول: emamj@ut.ac.ir

2001) خشک کردن اسمزي به عنوان يک فرآيند خشک کردن نسبي، شامل تماس مستقيم بافت گياهي يا حيواني با محلول هايپرتونيک است که موجب خروج آب از غشاي نيمه تراواي مادهي غذايي و انتقال اجزاي محلول اسمزي به داخل مادهي غذايي ميگردد. ساختار سلولي پيچيدهي مادهي غذايي را ميتوان به عنوان غشاي نيمه تراوا در نظر گرفت و در حقيقت اختلاف پتانسيل شيميايي بين مادهي غذايي و محيط اسمزي، نيروي محرک خشک کردن به شمار ميرود. خشک کردن اسمزي به طور وسيعي به عنوان يک مرحلهي پيش فرآيند در روشهاي خشک کردن مواد غذايي به منظور افزايش کيفيت محصول با حفظ يکپارچگي آن استفاده ميشود (Ponting, 1973; Khin et al., 2006) از آنجائي که غشايي که از طريق آن انتقال اسمزي صورت ميپذيرد، کاملاً انتخابي عمل نميکند، مواد حلشده در محلول اسمزي به داخل محصول نفوذ ميکنند. بنابراين خشک کردن اسمزي را ميتوان به عنوان فرآيند انتقال جرم غير همسوي همزمان معني کرد (Lenart & Flink, 1984; Tahmasbi et al., 2006). به علاوه يک عمل آبشوئي مواد حلشدهي خود محصول (قندها، اسيدهاي اُرگانيک، مواد معدني، ويتامينها و غيره) نيز حين فرآيند روي ميدهد که از لحاظ کميتي در مقايسه با دو انتقال جرم يادشده قابل چشمپوشي است اما در هر حال ترکيب نهايي محصول را تحت تأثير قرار ميدهد (Gupta et al., 2007). بسته به متغيرهاي فرآيند، مقدار جزء محلول اسمزي نفوذي، در کل حدود ۱۰- ۵ درصد وزن اوليهي محصول است. اين ميزان نه تنها مزهي محصول نهايي را تغيير ميدهد (Pointing, 1973)؛ بلکه لايههاي سطحي مادهي غذايي را مسدود ميسازد و بدين ترتيب يک مقاومت اضافي در برابر تبادل جرم به وجود آورده و نرخ خشک کردن تکميلي (تحت خلأ، جرياني و انجمادي) را کند ميکند (Araujo & Murr, 2002). در چنين موقعيتي تعيين شرايط بهينهي فرآيند که در آن بيشترين ميزان کاهش رطوبتي (WL) و کمترين ميزان جذب مواد جامد (SG) از محلول اسمزي به دست ميآيد، حائز اهميت خواهد بود. اما تحقيقات اندکي در اين رابطه وجود دارد که تعدادي از آنها از روش سطح پاسخ[1] (RSM) با رويکردهاي متفاوت براي بهينهسازي فرآيند خشک کردن اسمزي، استفاده نمودهاند (Ravindra & Chattopadhyay, 2000; Madamba & Lopez, 2002; Riberio et al., 2002; Corzo & Gomez, 2004). روش سطح پاسخ يک ابزار مهم براي بهتر ساختن فرآيند و محصول به شمار مي رود. RSM در واقع مجموعهايست از طرحهاي آزمايشي و تکنيکهاي بهينهسازي که آزمايشگر را قادر به تعيين رابطهي بين پاسخ و متغيرهاي مستقل ميسازد. RSM نوعاً براي ترسيم يک سطح پاسخ بر محدودهي مورد نظر، بهينهسازي پاسخ، يا براي انتخاب شرايط فرآيند براي دستيابي به مشخصات هدف يا نيازمنديهاي مصرف کننده به کار ميرود (Box & Draper, 1987; Myers et al., 1996; Khuri & Cornell, 1996; Eren & Kaymak- Ertekin, 2006)

هدف از اين مطالعه بررسي تأثير دما، زمان فرآيند، غلظتهاي شربت گلوکز و نمک بر پديدهي انتقال جرم در طول فرآيند اسمز هويج در محلولهاي دوگانهي شربت گلوکز/ نمک به منظور مدل کردن WL، SG، کاهش وزن (WR) و a_w به عنوان توابعي از متغيرهاي مستقل فرآيند و همچنين به دست آوردن شرايط بهينهي فرآيند شامل بيشترين WL و WR وکمترين SG و a_w بود.

مواد و روشها

مواد

در اين مطالعه، هويج استفاده شده رقم محلي بوده و به منظور همگن شدن نمونهها از يک سبزي فروشي و به صورت روزانه تهيه گرديد. هويج مصرفي تا هنگام استفاده در دماي ۴-۵°C در يخچال نگهداري شد. خريد روزانه به منظور جلوگيري از بروز خطاي ناشي از رسيدن و از دست دادن رطوبت، ضروري به نظر مي رسيد. از يک خلالکن دستي براي برش هويج به قطعات مکعبي شکل ۱×۱×۱سانتيمتر استفاده شد. مکعبها شسته شدند تا خردههاي هويج چسبيده به سطح آنها حذف شود و سپس آب آنها با دستمال خشککن گرفته شد. محتواي رطوبت اوليهي هويج بين ۸۶ تا ۹۰ درصد (وزن مرطوب) متغير بود.

فرآيند اسمز

با در نظر گرفتن تأثير بيشتر محلول هاي چند جزئي نسبت به محلولهاي تک جزئي، محلول دو گانهي نمک و شربت گلوکز به عنوان محلول اسمزي انتخاب گرديد. اين محلولها مجموعاً در نُه غلظت آماده شدند. غلظتهاي انتخاب شده براي شربت گلوکز ۳۰، ۴۰ و۵۰ (درصد وزني) و غلظتهاي نمک طعام ۵، ۱۰ و ۱۵ (درصد وزني) بود. آزمايشها در سه سطح دمايي ۳۰، ۴۰ و ۵۰°C انجام شد. محلول اسمزي به دماي مورد نظر رسانده شد. نمونهها با رعايت نسبت محلول به نمونه معادل ۱۰ به ۱ به بشر حاوي محلول اسمزي اضافه شد و براي جلوگيري از تبخير آب، دهانهي بشر با يک پوشش پلاستيکي بسته شد. به منظور يکنواختي پروفيل غلظت محلول اسمزي و همگن شدن دما در نواحي مختلف محلول اسمزي

1. Response Surface Methodology (RSM)

عمل همزني با سرعت ۲۰۰ rpm انجام شد (Tahmasbi et al., 2006). عمل همزني جهت پيشبرد انتقال جرم و جلوگيري از شکل‌گيري يک فيلم رقيق اطراف قطعات نمونه ضروري به نظر مي‌رسيد. عمل آنزيم‌بري پيش از فرآيند اسمز انجام نشد زيرا گزارش شده است که اين عمل به علت از دست رفتن خاصيت نيمه‌تراوي غشا در فرآيند اسمز اختلال ايجاد مي‌کند و همچنين موجب کاهش بتاکاروتن هويج مي‌گردد (Bao & Chang, 1994). نمونه‌ها پس از طي زمان‌هاي ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ دقيقه، با توجه به طرح آزمايش از محلول اسمزي خارج شد. سپس با آب مقطر شسته شده و با استفاده از كاغذ حوله‌اي خشک‌کن، آب اضافي آنها گرفته شد و توزين شدند. به دليل اينکه محلول اسمزي سطح خارجي نمونه‌ها را مي‌پوشاند، عمليات شستشو و خشک کردن لازم به نظر مي‌رسيد. وجود محلول بر سطح خارجي نمونه‌ها منجر به چسبيدن آنها به هم در طي نگهداري شده و در طعم نمونه ها موثر است. محتواي مواد جامد کل نمونه‌هاي تازه و تيمارشده با اُون خلأ تعيين شد (AOAC, 1980). فعاليت آبي (aw) نمونه‌هاي خشک شده به روش اسمز با استفاده از يک دستگاه سنجش aw (Novasina TH-500) با دقت ۰/۰۰۱± در۲۵°C اندازه‌گيري شد. به منظور به حداقل رسانيدن تأثيرات تغييرپذيري ناخواسته در پاسخ‌هاي مشاهده شده به علت عوامل خارجي، آزمايش‌ها به صورت تصادفي[1] انجام شدند. تمامي آزمون‌ها در تکرار سه تايي انجام شد و مقدار ميانگين در محاسبات وارد شد. ارزيابي تبادل جرمي بين محلول اسمزي و نمونه‌ها طي خشک کردن اسمزي با استفاده از پارامترهايي نظير WL، SG و WR انجام شد. براي محاسبه‌ي اين پارامترها از معادله‌هاي زير استفاده شد:

$$WL = \frac{m_i z_i - m_f z_f}{m_i} \times 100 \quad \text{گرم / 100 گرم نمونه تازه} \qquad (۱)$$

$$SG = \frac{m_f s_f - m_i s_i}{m_i} \times 100 \quad \text{گرم / 100 گرم نمونه تازه} \qquad (۲)$$

$$WR = WL - SG \quad \text{گرم / 100 گرم نمونه تازه} \qquad (۳)$$

در معادلات بالا m_i و m_f به ترتيب جرم‌هاي اوليه و نهايي (گرم) نمونه‌ها؛ z_i و z_f به ترتيب کسر جرمي اوليه و نهايي آب (گرم آب/ گرم نمونه) ؛ و s_i و s_f به ترتيب کسر جرمي اوليه و نهايي مواد جامد کل (گرم مواد جامد کل / گرم نمونه) مي‌باشند (Eren & Kaymak- Ertekin, 2006).

1. Randomized

طرح آزمايش و تجزيه و تحليل آماري

روش سطح پاسخ براي برآورد تأثير عمده‌ي متغيرهاي فرآيند، بر WL، SG ، WR و aw طي خشک کردن اسمزي هويج به‌کار رفت. زمان فرآيند (x_1)، دما (x_2)، غلظت نمک (x_3) و غلظت شربت گلوكز (x_4) به عنوان متغيرهاي مستقل انتخاب شدند. يک طرح گردش‌پذير کامپوزيت مرکزي[2] (CCRD) براي طرح‌ريزي داده‌هاي تجربي به‌کار برده شد. طرح شامل ۳۱ آزمايش بود که با افزودن ۷ (n_0) نقطه‌ي مرکزي و ۸ $(\lambda = 2)$ نقطه‌ي محوري (بر اساس طرح سطح پاسخ و با توجه به داده‌هاي نرم افزار) به طرح فاکتوريل کامل 2^4 اتخاذ شد. اجراهاي[3] مرکزي يک ابزار براي برآورد خطاي آزمايشي و اندازه‌گيري عدم برازش[4] ارائه مي‌کند. نقاط محوري به طرح فاکتوريل اضافه شدند تا بتوان انحناي مدل[5] را برآورد کرد. مقادير کد شده مطابق با مقادير طبيعي هر متغير و CCRD تعيين شد. مدل چند جمله‌اي درجه ۲ زير، داده‌ها را پوشش مي‌داد. چهار مدل به فرم مذکور براي ارتباط دادن پاسخ‌ها (Y_k) يعني WL، SG ، WR و aw به چهار متغير فرآيند (x_i) توسعه يافت:

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^{4} \beta_{ki} x_i + \sum_{i=1}^{4} \beta_{kii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{4} \beta_{kij} x_i x_j \qquad (۴)$$

(k=۱،۲،۳،۴)

در اين معادله β_{k0} β_{kii}, β_{ki} و β_{kij} ضرايب ثابت رگرسيون؛ و x متغير مستقل کد شده است. مدل‌هاي رياضي براي هر پاسخ به‌وسيله‌ي تجزيه رگرسيون خطي چندگانه، ارزيابي شدند. مدلسازي با مدل درجه دوم دربرگيرنده‌ي جملات اثر متقابل[6]، آغاز شد. جملات معني‌دار در مدل با استفاده از تجزيه واريانس (ANOVA) براي هر پاسخ يافت شد. معني‌دار بودن با تعيين سطح احتمال اينکه عدد F محاسبه شده از داده‌ها کمتر از ۵% باشد، قضاوت شد. شايستگي[7] مدل با استفاده از R^2، R^2 تنظيم شده[8]، R^2 پيش‌بيني شده[9] و مجموع مربعات خطاي پيش‌بيني[10] (PRESS) ارزيابي شد. يک مدل خوب، R^2 پيش‌بيني شده بالا وPRESS پائيني خواهد داشت. بالا بودن مقدار R^2 هميشه دلالت بر مناسب بودن مدل نمي‌کند. افزودن يک متغير اضافي به مدل قطع نظر از اينکه متغير اضافي به طور

2. Central Composite Rotatable Design
3. Run
4. Lack of Fit
5. Curvature of the Model
6. Interaction Terms
7. Adequacy
8. Adjusted -R2
9. Predicted -R2
10. Prediction error sum of squares

آماري معنيدار است يا نه، همواره R^2 را افزايش ميدهد. بنابراين ترجيحاً از adj-R^2 براي ارزيابي شايستگي مدل استفاده ميشود که بايستي بالاتر از ۸۵% باشد (Myers & Montgomery, 1995). پس از آنکه برازش مدل انجام پذيرفت، تجزيه مازاد به منظور اعتبار بخشيدن به فرضيات استفادهشده در تجزيه واريانس انجام شد (نتايج نشان داده نشده است). حداکثر و حداقلسازي چندجملهايها به منظور برازش با روش تابع مطلوبيت انجام شد و ترسيم پاسخهاي برازشيافته با استفاده از نرمافزار Minitab Version 6 صورت پذيرفت.

بهينهسازي

طي بهينه کردن فرآيندهاي صنعتي، معمولاً چندين متغير پاسخ توصيفکنندهي خصوصيات کيفيتي سيستم بايستي بهينه شوند. تعدادي از اين متغيرها بايستي بيشينه شوند و تعدادي بايد به حداقل رسانيده شوند. در بسياري از موارد اين پاسخها با هم ارتباط دارند؛ براي مثال افزايش يک پاسخ ممکن است تأثير معکوس بر ديگري داشته باشد که بدين ترتيب وضعيت را پيچيدهتر ميسازد. رويکردهاي متعددي براي غلبه بر اين مسئله مورد استفاده قرار گرفتهاند. يکي از آنها دستورالعمل بهينهسازي اجباري را به کار ميبرد؛ دومي دياگرامهاي کرانهاي[1] متغيرهاي پاسخ متفاوت را اضافه ميکند و رويکرد سوم شامل حل کردن مسئلهي پاسخهاي چندگانه از طريق استفاده از تابع مطلوبيت است که تمامي پاسخها را با يک معيار[2] ترکيب ميکند. فوايد استفاده از توابع مطلوبيت عبارتند از: (۱) پاسخهايي که مقياس متفاوتي دارند قابل مقايسه کردن خواهند بود، (۲) تبديل پاسخهاي به يک معيار، ساده و سريع است، و (۳) هر دوي پاسخهاي کيفي و کمي ميتوانند مورد استفاده قرار گيرند (Harrington, 1965). اين رويکرد بر اين پايه است که "کيفيت" يک محصول يا فرآيند که داراي ويژگيهاي کيفيتي متعددي است، با يک مورد خارج از محدودهي "مطلوب"، کاملاً غير قابل قبول است. اين شيوه شرايط عملياتي x تأمينکنندهي مقادير پاسخ با "بيشترين مطلوبيت" را مييابد. بسته به اينکه يک پاسخ ويژه Yi بايد بيشينه يا کمينه گردد، توابع مطلوبيت متفاوتي d_i (Y_i) ميتوانند مورد استفاده قرار گيرد (Derringer & Suich, 1980). L_i، U_i و T_iرا به ترتيب به عنوان مقادير پائينتر، بالاتر و هدف که براي پاسخ Y_i مطلوباند، در نظر بگيريد. درصورتي که يک پاسخ بايد بيشينه شود، در اين حالت تابع اختصاصي آن با نماي s که تعيينکنندهي اهميت مطلوبيت رسيدن به ميزان هدف است، خواهد بود. براي $s=1$ تابع مطلوبيت به طور خطي به سمت T_i افزايش مييابد که بيانگر مقدار کافي پاسخ ميباشد؛ براي $s<1$ تابع محدب است و براي $s>1$ تابع مقعر خواهد بود:

$$d_i(\hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{y}_i(x)-L_i}{T_i-L_i}\right)^s & L_i \leqslant \hat{y}_i(x) \leqslant T \\ 1 & \hat{y}_i(x) > T_i \end{cases} \quad (۵)$$

در صورتي که يک پاسخ بايد به حداقل کاهش يابد، در اين حالت تابع مطلوبيت اختصاصي آن با Ti که نشاندهندهي يک مقدار کوچک کافي براي پاسخ است، ميباشد:

$$d_i(\hat{y}_i) = \begin{cases} 1 & \hat{y}_i(x) < T_i \\ \left(\frac{\hat{y}_i(x)-U_i}{T_i-U_i}\right)^s & T_i \leqslant \hat{y}_i(x) \leqslant U_i \\ 0 & \hat{y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (۶)$$

پس از آنکه مقادير مطلوبيت براي هر متغير پاسخ محاسبه شد، آنها با محاسبهي ميانگين هندسيشان، به شکل يک شاخص مطلوبيت واحد D ترکيب ميشوند. تغييرات بيشتر براي وزندهي ميتواند با استفاده از تخصيص دامنهاي از اعداد (مثلاً ۱ تا ۵) به درجهي اهميت بهينه کردن هر متغير پاسخ، داده شود. شاخص مطلوبيت نهايي به شکل زير محاسبه ميگردد:

$$D = \left(d_1^{v_1} \times d_2^{v_2} \times d_3^{v_3} \times \ldots \times d_n^{v_i}\right)^{1/\sum v_i} = \left(\prod_{i=1}^{n} d_i^{v_i}\right)^{1/\sum v_i} \quad (۷)$$

vi عددياست که تعيينکنندهي اهميت پاسخ i اُم است که ممکن است نوعاً يک عدد صحيح بين ۱ تا ۵ باشد؛ ۵ تعيينکنندهي بيشترين ميزان اهميت و ۱ نشاندهندهي کمترين ميزان اهميت خواهد بود. از آنجائي که محصول بهدست آمده از فرآيند اسمزي بايستي تا حد امکان رطوبت بيشتري از دست دهد (کاهش وزن بيشتر و aw کمتر) و در عين حال جذب مواد جامد کمتري از محلول اسمزي داشته باشد؛ در اين مطالعه توابع مطلوبيت با معيار بيشترين ميزان WL و WR و کمترين ميزان SG و aw اجرا شدند.

نتايج و بحث

برازش مدلها و نمودارهاي کرنهاي

تجزيه واريانس براي تعيين معنيدار بودن تأثير متغيرهاي فرآيند بر پاسخها انجام شد. جدول (۱) نشان ميدهد که تمامي متغيرهاي فرآيند تأثير معنيداري بر کاهش آب، جذب مواد جامد، کاهش وزن و فعاليت آبي در $p<۰/۰۱$ داشته اند. همان گونه که در ابتداي مطالعه فرض شده بود، تجزيه رگرسيون خطي چندگانهي دادههاي تجربي، مدلهاي چندجملهاي درجه دوم براي پيشبيني WL، SG، WR و aw ارائه کرد. جدول (۱)

1. Contour
2. Measurement

تجزيه واريانس براي برازش مدل‌هاي چند جمله‌اي درجه دوم با داده‌هاي تجربي را نشان مي‌دهد. مشاهده مي‌شود که کليه‌ي مدل‌هاي رگرسيون در سطح اطمينان ۹۹% معني‌دار هستند. مقدار معني‌داري تمامي تأثير اصلي، خطي، درجه دوم و تأثيرات متقابل محاسبه شده براي هر پاسخ را نيز مي‌توان در جدول (۱) مشاهده نمود. تأثيراتي که معني‌دار نيستند (p <۰/۰۵) بدون ايجاد اختلالي در سلسله مراتب مدل، از مدل‌ها حذف شدند. تجزيه واريانس همچنين نشان داد که مقادير عدم برازش[1] براي تمامي مدل‌هاي سطح پاسخ در سطح اطمينان ۹۵% معني‌دار نبود. از طرفي R^2 و R^2 تنظيم شده و ضريب پراکندگي (CV) به منظور بررسي شايستگي مدل محاسبه شدند. بخش بزرگي از تغييرپذيري (R^2 <۰/۹۲) در مدل‌هاي پاسخ را مي‌توان به طور موفقيت‌آميزي توسط مدل‌ها توضيح داد. در جدول (۱) ملاحظه مي‌شود که مقادير R^2 و adj-R^2 براي مدل‌ها تغيير چشمگيري نداشته و نشان مي‌داد که مدل در برگيرنده‌ي جملات غير معني‌دار نبود. ضريب پراکندگي (CV) که اشاره به پراکندگي نسبي نقاط تجربي از پيش‌بيني‌هاي مدل‌هاي SOP دارد، به ترتيب براي WL، SG ، WR و aw عبارتند از ۲/٤۵۹ %، ۰/۹۸۲ % ، ۲/۵۲۴% و ۰/۱۵۷ % بوده است.

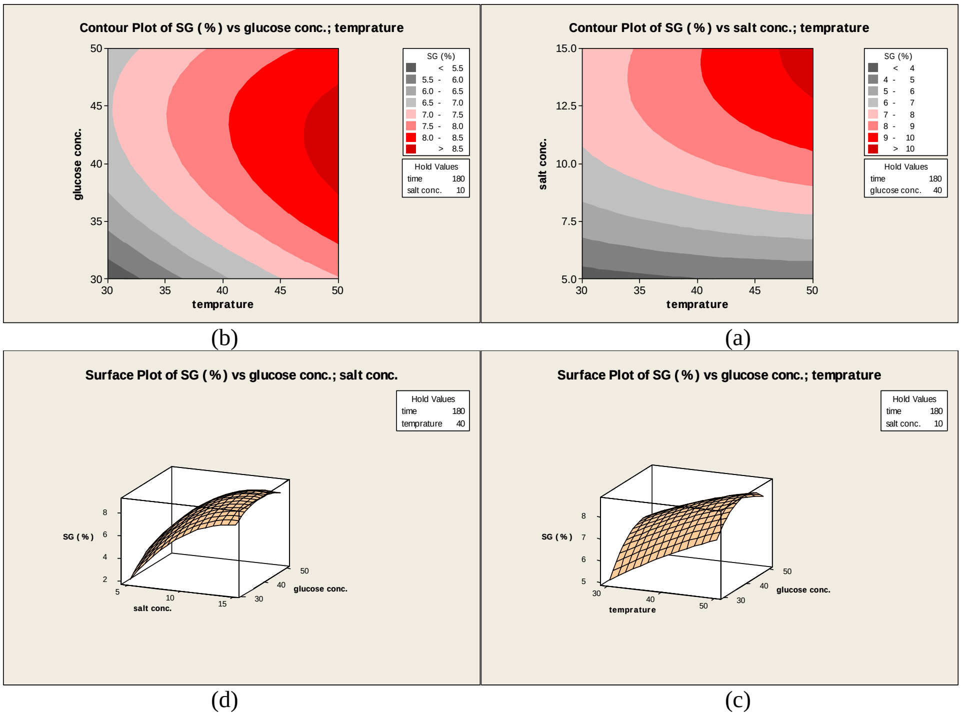
کاهش PRESS و R^2 پيش‌بيني شده، در مقايسه با R^2 برازش‌يافته دلالت بر اين دارد که مدل شايستگي پيش‌بيني دارد. R^2 پيش‌بيني‌شده مقدار پراکندگي در داده‌هاي جديد شرح داده شده توسط مدل را اندازه مي‌گيرد. به طور کلي عدد نزديک‌تر به يک، ترجيح داده مي‌شود و PRESS معياري است از اينکه مدل چقدر خوب هر نقطه در طرح را مي‌پوشاند (Eren & Kaymak- Ertekin, 2006).

1. Lack of fit

جدول ۱- جدول **ANOVA** نماينده‌ي جمله‌هاي خطي، درجه دوم و اثر متقابل هر متغير و ضرايب (**.Coef**) مدل پيش‌بيني‌کننده

منبع	درجه‌آزادي	WL (%)		SG (%)		WR (%)		Aw	
		Coef.	p-value	Coef.	p-value	Coef.	p-value	Coef.	p-value
مدل	۱٤	٦۰/۲۳۹	<۰/۰۰۰۱	۷/۸۵۲	<۰/۰۰۰۱	۵۲/۳۸۳	<۰/۰۰۰۱	۰/۸۵۱	<۰/۰۰۰۱
X_1	۱	۳/۸۷٤	<۰/۰۰۰۱	۰/۳۵۷	<۰/۰۰۰۱	۳/۵۰٦	<۰/۰۰۰۱	-۰/۰۱۷	<۰/۰۰۰۱
X_2	۱	۲/۳۸۹	۰/۰۰۱	۰/۹۵۲	۰/۱٤۳	۱/٤۵۰	۰/۰۲۷	-۰/۰۱۵	۰/۰۰۱
X_3	۱	۵/۳۹۵	<۰/۰۰۰۱	۲/٤۹۱	<۰/۰۰۰۱	۲/۸۹۳	<۰/۰۰۰۱	-۰/۰۳۸	<۰/۰۰۰۱
X_4	۱	۷/۷۱۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۸۵۷	۰/۰۲۲	۷/۱۳۵	<۰/۰۰۰۱	-۰/۰۳۹	<۰/۰۰۰۱
X_{12}	۱	-۰/۳٤۲	۰/۸۲٦	۰/٤۸۱	۰/٤٤۲	-۰/۸۱۸	۰/٦۰۹	۰/۰۱۳	۰/۲۱۸
X_{22}	۱	-۲/۳۹۲	۰/۱۳۷	-۰/۱٤۹	۰/۸۱۰	-۲/۲۸۳	۰/۱۷۲	-۰/۰۰۳	۰/۷٦۳
X_{32}	۱	۲/۷۷۸	۰/۰۸۷	-۱/٤۱٤	۰/۰۳٤	٤/۱۹۷	۰/۰۱٦	-۰/۰۳٦	۰/۰۰۲
X_{42}	۱	-۲/۰۳۲	۰/۲۰۲	-۰/۸٤٤	۰/۱۸۵	-۱/۱۸۳	۰/٤٦۱	-۰/۰۱۲	۰/۲۳٦
X_1X_2	۱	۰/۱۹۸	۰/۷۵۱	-۰/٤۲٤	۰/۱۰۳	۰/٦۰۹	۰/۳٤۹	-۰/۰۰۲	۰/۵۹٦
X_1X_3	۱	-۰/۱۰٤	۰/۸٦۷	۰/۱۷۹	۰/٤۷٦	-۰/۲٦۹	۰/٦۷۵	۰/۰۰۱۹	۰/٦٤۰
X_1X_4	۱	۰/٤٦۹	۰/٤۵٦	۰/۲۳٦	۰/۳۵۱	۰/۲۱۹	۰/۷۳۳	-۰/۰۰۷	۰/۱۱۱
X_2X_3	۱	-۰/۰۰۱	۰/۹۹۹	۰/٦۵۳	۰/۰۱۷	-۰/٦٦۷	۰/۳۰٦	-۰/۰۰۱	۰/۸۰۲
X_2X_4	۱	-۰/٦٦۲	۰/۲۹۸	-۰/۲۳٦	۰/۳۵۱	-۰/٤۱۳	۰/۵۲۲	۰/۰۰۰۵	۰/۹۰۰
X_3X_4	۱	-۱/٤۷۹	۰/۰۲۹	-۰/٤۰۹	۰/۱۱۵	-۱/۰۸٤	۰/۱۰۵	۰/۰۰۲۸	۰/٤۹٤
عدم برازش	۱۰		۰/۰۸۵		۰/۱۹۹		۰/۱۰۲		۰/٤٤۱
R^2		۰/۹۵۵		۰/۹۲۰			۰/۹۳۳		۰/۹۵۰
Adj-R^2		۰/۹۱٦		۰/۸۵۰			۰/۸۷٤		۰/۹۰٦
CV		۲/٤۵۹		۰/۹۸۲			۲/۵۲٤		۰/۱۵۷

ضرايب معادله‌ي رگرسيوني مدل‌هاي پيشنهاد شده براي هر پاسخ در جدول (۱) آمده‌اند. براي تصور کردن تأثير توأم فاکتورها بر پاسخ، نمودارهاي سطح پاسخ و کرانه‌اي براي هر کدام از مدل‌هاي برازش‌شده بر اساس دو متغير و ثابت نگهداشتن دو متغير ديگر در حد مرکزي ارائه شدند. شکل (۱) تأثير غلظت‌هاي مواد حل‌شده در محلول اسمزي (a، b و c) بر ميزان جذب مواد جامد از محلول اسمزي توسط نمونه‌ها را نشان مي‌دهد. بخش d تأثير غلظت شربت گلوکز و نمک در محلول را بر SG نمايش مي‌دهد. در ابتداي فرآيند، به دليل بالا بودن نيروي محرک اسمزي بين محلول غليظ و نمونه‌ي تازه، نرخ حذف آب و جذب مواد جامد نسبتاً بيشتر بود. همان‌گونه که در شکل ۱ (a، b و c) مشاهده مي‌شود هرچه غلظت اجزاي محلول اسمزي و دما بيشتر باشد، مقدار SG نيز بيشتر خواهد بود. نتيجه‌ي يکساني در مورد تأثير غلظت اجزاي محلول اسمزي بر SG (d) مشاهده شد.

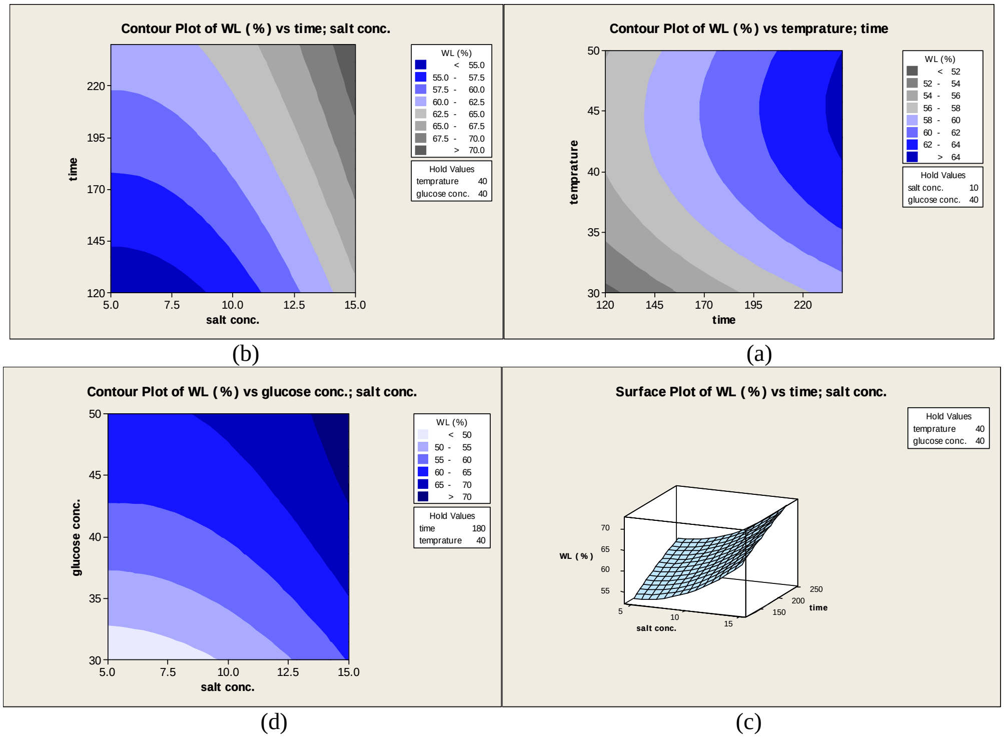


شکل ۱- نمودارهاي سطح پاسخ و کرانه‌اي **SG**

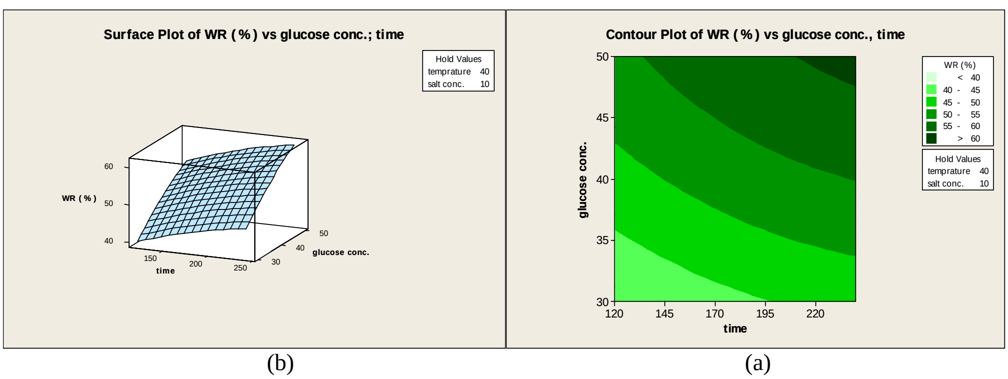
اگرچه با نزديک شدن زمان فرآيند به حد پاياني (۳ ساعت)، WL نسبتاً به شرايط تعادلي رسيد، اما SG همچنان افزايش يافت. اين افزايش در ميزان جذب مواد جامد، لايه‌هاي سطحي محصول را مسدود کرده و موجب کاهش گراديان غلظت بين محصول و محلول اسمزي مي‌گردد که باعث مقاومت اضافي در برابر تبادل جرم و کاهش نرخ WL و در نتيجه نرخ کاهش وزن (WR) در ادامه‌ي زمان فرآيند مي‌شود (شکل ۲-a). حذف سريع آب، در مراحل اوليه‌ي خشک کردن اسمزي توسط تعداد زيادي از پژوهشگران گزارش شده است (Lazarides et al., 1995; Lewicki & Lenart, 1995; Ertekin et al., 1996; Genina-Soto et al., 2001). افزايش درجه حرارت در زمان فرآيند موجب بالا رفتن سريع ميزان WL و در نتيجه کاهش زماني مي‌شود که براي رسيدن به غلظت‌هاي تعادلي مورد نياز است. اين اثر متقابل بين زمان و دما با نتايج حاصل از تجزيه واريانس مطابقت دارد (جدول۲). شکل ۲ (b و c) تأثير مستقيم زمان و غلظت نمک را بر WL نشان مي‌دهد. واضح است که زماني‌که غلظت نمک را در تيمارهاي مختلف بالا مي‌بريم، با پيشرفت فرآيند اسمز، رطوبتي که از بافت خارج مي‌شود افزايش مي‌يابد. همچنين قسمت d (شکل ۲) تأثير توأم غلظت‌هاي اجزاي محلول دوگانه بر WL را نشان مي‌دهد. تأثير مستقيم پابرجاست.

در زمان‌هاي کوتاه فرآيند، افزايش دما WL را بيشتر از SG افزايش داد که اين امر موجب افزايش WR شد. اين پديده به اختلاف‌هاي ديفوزيوني ميان آب و مواد حل شده در محلول اسمزي مربوط به جرم مولي آنها نسبت داده مي‌شود (Torreggiani, 1993). به هر حال، با نزديک شدن به نقطه‌ي پاياني تعادل WL به طور معني‌داري تحت تأثير دما قرار نگرفت (شکل ۲-a) در حاليکه SG همچنان افزايش يافت. بعلت بالا بودن ميزان WL نسبت به SG ، فرايند از نظر آبگيري سريعتر به حالت تعادل رسيده و کمتر تحت تاثير عواملي مانند حرارت يا همزني قرار مي گيرد (Madamba & Lopez, 2002). بالا رفتن ميزان SG، فعاليت آبي محصول را به طور قابل توجهي کاهش مي‌دهد. تأثير دما در غلظت‌هاي بالاي شربت گلوکز به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۳). تعدادي از محققان[1] اين اثر را چنين توجيه نمودند که با بالا رفتن دما، به علت ويسکوزيته‌ي پايين محيط اسمزي، خصوصيات انتقالي آب بهتر خواهد بود. در تمامي زمان‌هاي فرآيند WL به آرامي با افزايش غلظت شربت گلوکز افزايش مي‌يابد در حاليکه SG به طور معني‌داري تحت تأثير قرار نگرفت. افزايش SG در دماهاي بالاتر (۵۰°C-۴۰) همانند WL و WR بيشتر بود (Chenlo et al., 2002; Moreira et al., 2003).

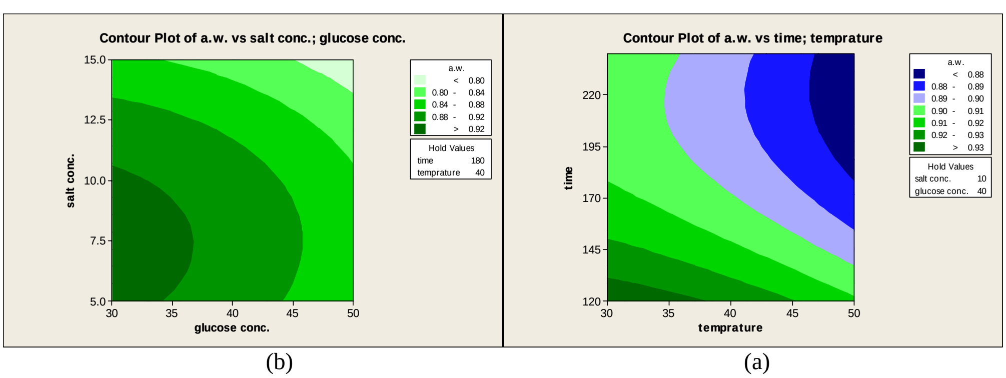
1. Chenlo, et al. (2002); Moreira, et al. (2003)



شکل ۲- نمودارهاي سطحي و كرانه‌اي **WL**



شکل۳- نمودارهاي سطحي و كرانه‌اي **WR**



شکل۴- نمودارهاي سطحي و كرانه‌اي **aw**

در تمامي دماهاي فرآيند، تأثير غلظت نمک بر WL، SG ، WR و aw بيشتر از تأثير غلظت شربت گلوکز بود. جدول (۱) نشان مي‌دهد که معني‌داري تأثيرات خطي و درجه دوم غلظت نمک بيشتر از تأثيرات خطي و درجه دوم غلظت شربت گلوکز است. اين موضوع را مي‌توان به خواص يونيزه‌کنندگي و وزن مولکولي پائين نمک که باعث نفوذ سريع آن به محصول مي‌شود و خاصيت کاهندگي فعاليت آبي نمک که نيروي محرک خشک کردن را بيشتر مي‌کند، نسبت داد.

در دماهاي بالا با پيشرفت زمان، فعاليت آبي کاهش مي‌يابد (شکل ۴-a). اگرچه افزايش غلظت‌هاي شربت گلوکز و نمک WL، SG ، WR را افزايش مي‌دهد، تأثير غلظت نمک بر SG و aw نسبت به غلظت شربت گلوکز بيشتر مشهود است. اين موضوع را مي‌توان با تأثير هم‌افزايي محلول‌هاي شربت گلوکز و نمک بر کاهش فعاليت آبي (شکل ۴-b) توجيه کرد. نتايج مشابهي توسط تعداد زيادي از محققان گزارش شده است (Collignan et al., 1994; Giempero et al., 2001; Sacchetti et al., 2001; Sereno et al., 2001).

همان‌طور که ملاحظه مي‌شود پديده‌ي انتقال جرم طي خشک کردن اسمزي ممکن است بسته به متغيرهاي فرآيند به شکل متفاوتي انجام شود. اين موضوع به طور قابل توجهي خصوصيات کيفي محصول نهايي را تغيير مي‌دهد. با به‌کار گرفتن سطوح معيني از متغيرهاي فرآيند مي‌توان محصولات ويژه به دست آورد. براي دستيابي به مقادير بالاي WL، فرآيند خشک کردن اسمزي بايستي در دماهاي بالا و در زمان‌هاي کوتاه انجام شود؛ ولي در اين صورت افزايش جذب مواد جامد از محلول اسمزي اجتناب‌ناپذير خواهد بود. اگر هدف به‌حداقل رسانيدن SG باشد، ترجيحاً بايد از دماها و غلظت‌هاي پائين محلول اسمزي استفاده شود. اما در اين شرايط زمان‌هاي فرآيند طولاني براي رسيدن به مقدار مطلوب WL مورد نياز خواهد بود. بنابراين براي به‌دست آوردن محصول نهايي مطلوب، بايستي پارامترهاي فرآيند بهينه شوند.

بهينه‌سازي

شرايط بهينه‌ي خشک کردن اسمزي هويج براي دستيابي به بيشترين WL و WR وکمترين SG و aw تعيين شد. در اين مطالعه مدل‌هاي چندجمله‌اي درجه دوم به دست آمده براي هر پاسخ مورد استفاده قرار گرفتند تا شرايط بهينه‌ي خاص، تعيين شود. اين مدل‌هاي رگرسيوني تنها در حوزه‌ي انتخاب شده اعتبار دارند. بنابراين ناحيه‌ي عملياتي با در نظر گرفتن تعدادي از محدوديت‌هاي اقتصادي، صنعتي و کيفيتي محصول تعيين شد. در اين تحقيق، دما، زمان فرآيند، غلظت شربت گلوکز و غلظت نمک به ترتيب در محدوده‌ي ۳۰-۵۰°C، ۱۲۰-۲۴۰ دقيقه، ۳۰-۵۰% و ۰-۱۵% انتخاب شدند. با به‌کارگيري روش تابع مطلوبيت، دو محلول دربرگيرنده‌ي معيارهاي بهينه به‌دست آمد. اولي با دماي ۳۰°C، زمان ۲۲۷/۱۱۹ دقيقه، غلظت شربت گلوکز ۴۳/۳۱۵ و غلظت نمک ۵%؛ و دومي با دماي ۴۹/۸۷۶ °C، زمان ۲۱۶/۹۰۷ دقيقه، غلظت شربت گلوکز ۴۶/۸۱۴ و غلظت نمک ۵% بود. نتايج حاکي از اين است که زمان فرآيند با افزايش درجه حرارت کاهش مي‌يابد، ولي کار کردن در دماهاي بالا تأثيرات منفي بر کيفيت محصول و هزينه‌هاي انرژي خواهد داشت. اگرچه مقدار مطلوبيت محلول دوم بيشتر بود ولي شرايط به‌دست آمده در محلول اول به عنوان شرايط بهينه انتخاب شد. در اين نقطه WL، SG ، WR و aw به ترتيب ۶۶/۹۷ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه)، ۴/۴۷۵ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه)، ۶۲/۵۲ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه) و ۰/۷۸۹ محاسبه شدند. همچنين مقدار فعاليت آبي کمتر از ۰/۸۰۰ به دست آمد که معمولاً دستيابي به آن در فرآيندهاي خشک کردن اسمزي، دشوار است. شايان ذکر است که تصميم نهايي براي شرايط بهينه‌ي فرآيند بستگي به هزينه‌ها، کيفيت محصول و توقعات مصرف‌کننده دارد.

نتيجه‌گيري کلي

روش سطح پاسخ براي تعيين شرايط بهينه‌ي دستيابي به بيشترين WL و WR وکمترين SG و aw در خشک کردن اسمزي هويج مورد استفاده قرار گرفت. تجزيه واريانس نشان داد که تأثير تمامي متغيرهاي فرآيند شامل دما، زمان، غلظت‌هاي شربت گلوکز و نمک بر متغيرهاي وابسته (WL ، SG ، WR و aw) معني‌دار بود. مدل‌هاي چندجمله‌اي درجه دوم براي پيش‌بيني WL، SG ، WR و aw به‌دست آمدند. شرايط بهينه فرآيند، دماي ۳۰°C، زمان ۲۲۷/۱۱۹ دقيقه، غلظت شربت گلوکز ۴۳/۳۱۵ و غلظت نمک ۵% براي دستيابي به WL ۶۶/۹۷ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه) ، SG ۴/۴۷۵ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه)، WR ۶۲/۵۲ (گرم /۱۰۰ گرم نمونه‌ي تازه) و aw۰/۷۸۹ مشخص شد. از آنجايي که غلظت ۵% نمک (پائين‌ترين سطح در بازه‌ي انتخاب شده) به عنوان غلظت بهينه تعيين شد، بهتر است در مطالعات آينده بازه‌ي وسيع‌تري به کار گرفته شود. در اين مطالعه بر تعيين شرايط بهينه‌ي دستيابي به بيشينه‌ي WL و WR و کمينه‌ي SG و aw تمرکز شده است. ولي بايستي خصوصيات کيفي فراورده همانند رنگ، بافت، چروکيدگي و آبگيري مجدد و تأثيرات انجماد/يخزدايي نيز براي به‌دست آوردن ويژگي‌هاي نهايي مطلوب محصول، مورد بررسي قرار گيرند.

REFERENCES

Harrington, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21, 494-498.

Kalra, C. L. (1990). Role of blanching in vegetable processing. *Indian Food Packer* (September–October), 3–15.

Khin, M.M., Zhou, W., & Perera, C.O. (2006) A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 77, 84-95.

Khuri, A. I., & Cornell, J. A. (1996). *Response surfaces: Designs & analyses* (2nd ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 190p.

Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science & Technology*, 36, 53–59.

Lazarides, H. N., Katsanidis, E., & Nickolaidis, A. (1995). Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, 25, 151–166.

Lenart, A., & Flink, J. M. (1984a). Osmotic dehydration of potato. I. Criteria for the end point of the osmosis process. *Journal of Food Technology*, 19, 45–63.

Lewicki, P., & Lenart, A. (1995). Osmotic dehydration of fruits & vegetables. *Handbook of industrial drying* (2nd ed.). New York: Marcel Decker, Inc., pp. 691–713.

Madamba, S. P., & Lopez, R. I. (2002). Optimization of osmotic dehydration of mango (Mangifera Indica L.) slices. *Drying Technology*, 20 (6), 1227–1242.

Moreira, R., Chenlo, F., & Pereira, G. (2003). Viscosities of ternary aqueous solutions with glucose & sodium chloride employed in osmotic dehydration operation. *Journal of Food Engineering*, 57, 173–177.

Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (1995). *Response surface methodology, process & product optimization using designed experiments* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.

Ponting, J. D. (1973). Osmotic dehydration of fruits: Recent modifications & applications. *Process Biochemistry*, 8, 18 22.

Ravindra, M. R., & Chattopadhyay, P. K. (2000). Optimization of osmotic preconcentration & fluidized bed drying dehydrated quickcooking potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 44, 5–11.

Riberio, S. C. A., Tobinaga, S. & Riberio, C. F. A. (2002). Optimization of the osmotic dehydration of the Mapara Catfish (Hypophthalmus sdentatus) through response surface methodology. In Proceedings of the 13th *International Drying Symposium,* vol. B (p. 986). Beijing, China.

Sacchetti, G., Gianotti, A., & Dalla Rosa, M. (2001). Sucrose–salt combined effects on mass transfer kinetics & product acceptability. Study on apple osmotic treatment. *Journal of Food Engineering,* 49, 163–173.

Ainsworth, P., Burhan Uddin, M., & Ibanoglu, S. (2004). Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 65, 473-477.

AOAC (1980). Association of Official Analytical Chemist Official Methods of Analysis. Washington, DC.

Araujo, E. A. F. & Murr, F. E. X. (2002). Optimization of osmotic dehydration of nectarine *(Prunus persica)* using response surface methodology. In Proceeding of the 13th *International Drying Symposium,* vol. B (p. 1000). Beijing, China.

Bao, B., & Chang, K. C. (1994). Carrot pulp chemical composition, colour & water-holding capacity as affected by blanching. *Journal of Food Science*, 59, 1159–1167.

Box, G. E. P., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model building & response surfaces*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Chenlo, F., Moreira, R., Pereira, G., & Ampudia, A. (2002). Viscosities of aqueous solutions of sucrose & sodium chloride of interest in osmotic dehydration processes. *Journal of Food Engineering*, 54, 347–352.

Collignan, A., & Raoult-Wack, A. L. (1994). Dewatering & salting of cod by immersion in sugar/salt solutions. *Lebensmittel-Wissenschauft und Technologie*, 27, 259–264.

Corzo, O., & Gomez, E. R. (2004). Optimization of osmotic dehydration of cantaloupe using desired function methodology. *Journal of Food Engineering*, 64, 213–219.

Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219.

Dixon, G. M., & Jen, J. J. (1977). Changes of sugars & acids of osmovac dried apple slices. *Journal of Food Science*, 42, 1126–1127.

Eren, I., & Kaymak- Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79 (1), 344-352.

Ertekin, F. K., & C¸ akaloz, T. (1996). Osmotic dehydration of peas: I. Influence of process variables on mass transfer. *Journal of Food Processing & Preservation*, 20, 87–104.

Genina-Soto, P., Barrera-Cortes, J., Gutierra-Lopez, G., & Nieto, A. E. (2001). Temperature & concentration effects of osmotic media on osmotic dehydration profiles of sweet potato cubes. *Drying Technology*, 19(3&4), 547–558.

Giempero, S., Gianotti, A., & Dalla Rosa, M. (2001). Sucrose–salt combined effects on mass transfer kinetics & product acceptability. Study on apple osmotic treatments. *Journal of Food Engineering*, 49, 163–173.

Gupta. A.K., Kumar. A., & Singh. B. (2007). Study of mass transfer kinetics & effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, 471-480.

Shi, J., & Le Maguer, M. (2002). Osmotic dehydration of foods: mass transfer & modeling aspects. *Food Reviews International*, 18, 305–335.

Tahmasbi, M., Emam-Djomeh, Z., & Asgari, G. R., (2006), Effects of Pretreatments & Drying Methods on Dehydration of Tomato, In: IDS 2006, 15th *International Drying Symposium,* Budapest, Hungary.

Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruits & vegetable processing. *Food Research International*, 26, 59–68.

Saurel, R., Raoult-Wack, A. L., Rios, G., & Guilbert, S. (1994). Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. *International Journal of Food Science & Technology*, 29, 531–542.

Sereno, A. M., Moreira, R., & Martinez, E. (2001). Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single & combined aqueous solutions of sugar & salt. *Journal of Food Engineering*, 47, 43–49.