

شکل ۲- سرعت خشک کردن لایه ای نازک کدو با ضخامت ۱۰ میلی متر در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد

جدول ۲- نتایج داده های مدل های خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C و ضخامت ۱۰ میلی متر

ردیف	نام مدل	دما (°C)	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	MBE
۱	Newton	۶۰	۰/۹۷۸۷	۰/۰۰۲۱۹	۰/۰۴۴۹۶۷	-۰/۰۲۰۳۵۲
		۷۰	۰/۹۷۶۱	۰/۱۰۱۳۸۳	۰/۰۳۵۴۵۶	-۰/۰۰۸۲۵۹
		۸۰	۰/۹۳۲	۰/۱۴۵۶۹۹	۰/۰۳۵۷۰۴۹	۰/۱۳۱۰۰۶
۲	Fick's Diffusion	۶۰	۰/۹۷۴۴	۰/۰۰۲۶۲۸	۰/۰۴۴۹۶۲	-۰/۰۲۰۴۱
		۷۰	۰/۹۷۶۱	۰/۱۷۸۴۰۹	۰/۰۳۵۴۵۶	-۰/۰۰۸۲۵۹
		۸۰	۰/۸۹۸۱	۰/۲۱۲۰۵۳	۰/۰۳۶۴۰۵۱	۰/۱۳۳۳۸۹
۳	Hii, Law & Cloke	۶۰	۰/۹۹۹۲	۸/۲۴×۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۰۰۷۱۲۰۶۶	۰/۰۰۰۹۵۲۸۰۹
		۷۰	۰/۹۹۹۲	۰/۲۳۲۷۲۲	۰/۰۰۷۲۶۳۸۵	۳/۸۹۸۱۸E-۰۵
		۸۰	۰/۹۸۵۳	۰/۰۷۱۸۱۵	۰/۰۵۹۳۳۵۸۳	۰/۰۱۴۴۰۵۴۲۵
۴	Approximation of diffusion	۶۰	۰/۹۹۱۵	۰/۰۰۰۸۷۳	۰/۰۲۵۹۲	-۰/۰۰۱۶۴۶
		۷۰	۰/۹۹۲۳	۰/۱۲۵۸۹	۰/۰۲۵۴۴۱	-۰/۰۱۰۴۴۶
		۸۰	۰/۹۰۹	۰/۰۲۰۳۵۵	۰/۰۳۵۶۶۷۹	۰/۱۲۳۸۸۲
۵	Logarithmic	۶۰	۰/۹۸۷۱	۰/۰۰۱۳۲۶	۰/۰۳۱۹۳۹۱۰۴	-۱/۰۳۶۷E-۰۶
		۷۰	۰/۹۸۷۳	۰/۱۹۷۱۹۸	۰/۰۳۲۷۷۶۱۷۷	۴/۰۲۷۲۷E-۰۶
		۸۰	۰/۹۰۳	۰/۱۹۲۶۲۳	۰/۰۳۴۶۹۷۱۴۸۵	۰/۱۲۱۳۱۲۵۶۳
۶	Midilli-Kucuk	۶۰	۰/۹۸۰۹	۰/۰۰۱۹۶	۰/۰۳۶۸۵۳	-۰/۰۰۳۶۶۲
		۷۰	۰/۹۸۸۳	۰/۰۶۲۰۲۶	۰/۰۲۹۴۰۳	-۰/۰۰۳۵۰۵
		۸۰	۰/۹۹۲۱	۰/۰۷۱۹۷۹	۰/۱۸۹۷۰۹	۰/۰۶۴۶۵۶
۷	Modified Henderson and Pabis	۶۰	۰/۹۹۷	۰/۰۰۰۳۰۳	۰/۰۱۲۷۶۹	۰/۰۰۱۲۰۸
		۷۰	۰/۹۹۲	۰/۳۲۱۹۵۷	۰/۰۰۶۲۲۶	۰/۰۰۰۸۹۵
		۸۰	۰/۹۹۴۵	۰/۵۱۵۵۵۲	۰/۰۳۵۹۰۱	۰/۱۲۴۹۱۲
۸	Modified Page-II	۶۰	۰/۹۷۴۴	۰/۰۰۲۶۲۹	۰/۰۴۴۹۶۶	-۰/۰۲۰۳۵۲
		۷۰	۰/۹۸۵۱	۰/۱۲۶۷۲۹	۰/۰۳۵۴۵۶	-۰/۰۰۸۲۵۹
		۸۰	۰/۸۹۸۱	۰/۰۳۹۷۹	۰/۰۳۵۷۰۴۹	۰/۱۳۱۰۰۶
۹	Two-term exponential	۶۰	۰/۹۸۲۷	۰/۰۰۱۷۷۶	۰/۰۳۸۷۶۱	-۰/۰۱۴۷۴۲
		۷۰	۰/۹۸۹۶	۰/۱۱۲۳۲۴	۰/۰۳۱۵۰۱	-۰/۰۱۳۱۴
		۸۰	۰/۹۲۳۲	۰/۱۶۹۷۹	۰/۰۳۵۶۸۵۱	۰/۱۳۰۰۴۳
۱۰	Verma et al	۶۰	۰/۹۹۱۵	۰/۰۰۰۸۷۳	۰/۰۲۵۹۱۵	-۰/۰۰۱۶۷
		۷۰	۰/۹۹۲۳	۰/۱۲۵۸۹	۰/۰۲۵۴۴۱	-۰/۰۱۰۴۴۶
		۸۰	۰/۹۰۸۷	۰/۰۲۰۳۵۶۳	۰/۰۳۵۶۶۹	۰/۱۲۳۹۷

محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که مقدار انرژی فعال‌سازی برای میوه چامپداک،  $kJ/mol$   $6/80.3$ ، کیوی،  $kJ/mol$   $38/6$ ، گیلاس (تحت تیمار امولسیون قلیایی اتیل اولئات) برای نمونه‌های شاهد و پیش تیمار شده به ترتیب در حد  $kJ/mol$   $49/17$  و  $43/05$ ، میوه به (دماهای ۳۵، ۴۵ و  $55^{\circ}C$ ) در دامنه  $33/83$  تا  $41/52$   $kJ/mol$  محاسبه گردید (Chong *et al.*, 2008; Doymaz and Ismail, 2011).

### بحث

نتایج حاصل از بررسی رطوبت در دما و زمان‌های مختلف خشک‌کردن نشان داد که دمای خشک‌کردن اثر قابل ملاحظه‌ای بر زمان خشک‌کردن دارد، همچنین زمان لازم جهت خشک‌کردن کدو سبز در ضخامت ۱۰ میلی متر در دماهای ۶۰، ۷۰ و  $80^{\circ}C$  به ترتیب افزایش می‌یابد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی سبزیجات مختلف مشاهده گردید (Janjaia *et al.*, 2011; Evin, 2012).

### - ضرایب نفوذ موثر رطوبت

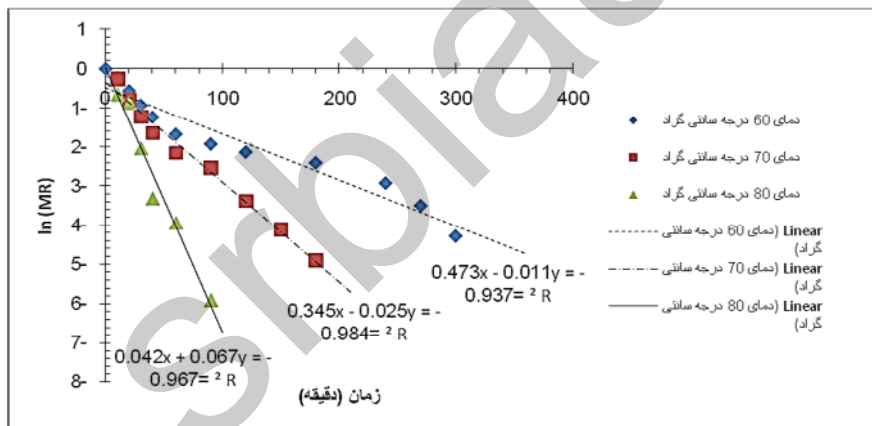
برای تعیین میزان ضرایب نفوذ موثر خشک کردن لایه‌ای نازک کدو سبز با روش جابجایی با هوای داغ، لگاریتم نسبت رطوبت بر مبنای زمان فرآیند در شکل ۳ ترسیم شد. در شکل ۴ ضریب نفوذ موثر رطوبت لایه‌های نازک کدو سبز خشک شده ارائه شده است.

ضرایب نفوذ موثر خشک‌کردن لایه‌ای نازک کدو، در دمای  $60^{\circ}C$  در حد  $(m^2/s) \times 10^{-7}$   $4/7965$ ، دمای  $70^{\circ}C$   $(m^2/s) \times 10^{-7}$   $2/03412$  و دمای  $80^{\circ}C$   $(m^2/s) \times 10^{-6}$   $2/74750$  محاسبه گردید.

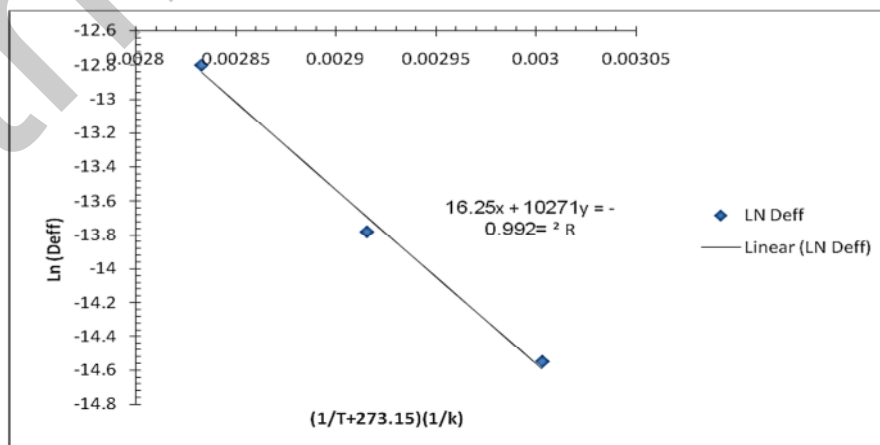
### - انرژی فعال سازی

انرژی فعال سازی از طریق رسم منحنی  $\ln D_{eff}$  در مقابل دما  $(1/(T+273.15))$  بدست آمد. مقدار انرژی فعال سازی در دامنه دمایی ۶۰ تا  $80^{\circ}C$  درجه سانتی‌گراد با ضخامت ۱۰ میلی‌متر برای لایه‌های نازک کدو سبز در حد  $(kJ/mol)$   $85/45$  بود.

مقدار انرژی فعال‌سازی توسط محققین برای



شکل ۳- نمودار خطی تغییرات لگاریتم نسبت رطوبت به زمان در تعیین ضرایب نفوذ موثر



شکل ۴- رابطه نفوذ موثر رطوبت و دمای مطلق بدست آمده از معادله آرنیوس



ضرایب نفوذ رطوبت در دامنه  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $3/79 \times 10^{-12}$  تا  $7/53 \times 10^{-12}$  تعیین گردید. برای گیلاس، ضریب نفوذ رطوبت موثر به ترتیب برای نمونه‌های مورد آزمایش (اتیل اولئات) و شاهد در دامنه  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $5/683 \times 10^{-9}$  و  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $1/544$  گزارش گردید. برای برش‌های میوه به (در دماهای ۳۵، ۴۵ و  $55^\circ\text{C}$ )، بین  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $0/65$  و  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $6/92$  بود (Chong et al., 2008; Therdthai & Zhou, 2009; Doymaz and Ismail, 2011).

مقدار انرژی فعال‌سازی توسط محققین برای محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که مقدار انرژی فعال‌سازی برای میوه چامپداک،  $6/803 \text{ kJ/mol}$  کیوی،  $3/8/6 \text{ kJ/mol}$ ، گیلاس (تحت تیمار امولسیون قلیایی اتیل اولئات) برای نمونه‌های شاهد و پیش تیمار شده به ترتیب در حد  $49/17 \text{ kJ/mol}$  و  $43/05$ ، میوه به (دماهای ۳۵، ۴۵ و  $55^\circ\text{C}$ ) در دامنه  $33/83$  تا  $41/52 \text{ kJ/mol}$  محاسبه گردید (Chong et al., 2008; Doymaz and Ismail, 2011).

### نتیجه گیری

در این بررسی، تاثیر دما بر خصوصیات خشک‌کردن لایه‌ای نازک کدو سبز مطالعه گردید. افزایش دمای خشک کردن سبب کاهش زمان و بالا رفتن سرعت خشک کردن و ضریب نفوذ موثر رطوبت موثر گردید، به طوری که کدو سبز خشک شده با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، در کمترین زمان، خشک گردید.

نتایج مدل‌سازی لایه نازک نشان داد که در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل هایلا و کلاک، به دلیل دارا بودن حداکثر  $R^2$  و حداقل  $\chi^2$  و RMSE به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن لایه ای نازک کدو سبز محسوب گردید که می توان از آن در توصیف پدیده انتقال رطوبت کدو استفاده نمود. ضرایب نفوذ موثر خشک کردن لایه‌ای نازک کدو، در دمای  $60^\circ\text{C}$  در حد  $(\text{m}^2/\text{s})$   $2/03412 \times 10^{-7}$  و  $4/7965 \times 10^{-7}$ ، دمای  $70^\circ\text{C}$ ،  $(\text{m}^2/\text{s})$   $2/03412 \times 10^{-7}$  و  $4/7965 \times 10^{-7}$ ، دمای  $80^\circ\text{C}$ ،  $(\text{m}^2/\text{s})$   $2/7475 \times 10^{-6}$  محاسبه گردید و میزان انرژی فعال‌سازی در حد  $(\text{kJ/mol})$   $85/45$  تعیین شد.

### منابع

Al-Harahsheh, M., Al-Muhtaseb, A. H. &

بررسی ضرایب همبستگی نمودار سرعت خشک کردن کدو سبز نشان داد که حداقل مقدار در کلیه نتایج  $0/801$  می‌باشد. با توجه به این مطلب که در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد می باشد، آهنگ از دست دادن رطوبت بالا خواهد بود. اما به تدریج با گذشت زمان و کاهش رطوبت کدو سبز، سرعت کاهش رطوبت نیز کاهش می یابد. البته با توجه به اینکه محصول بیشتر رطوبت خود را در مراحل اولیه فرآیند از دست می‌دهد، اما زمان زیادی برای از دست‌دادن رطوبت باقی‌مانده لازم دارد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی سبزیجات مختلف مشاهده گردید (Janjaia et al., 2011; Figiel, 2010; Evin, 2012; Chen et al., 2012).

نتایج مدل سازی سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک کدو سبز نشان داد که مدل هایلا و کلاک دارای بالاترین  $R^2$  و کمترین  $\chi^2$  و RMSE می‌باشد. بنابراین بالا بودن مقدار ضریب تبیین و کم بودن مقدار کای اسکوئر و ریشه میانگین مربعات خطا مهمترین دلیل در انتخاب بهترین مدل مورد برازش می‌باشد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی سبزیجات مختلف بدست آمده است (Janjaia et al., 2011; Evin, 2012). با توجه به شاخص‌های بدست آمده در جدول (۲)، مشخص می شود که مدل هایلا و کلاک در دماهای مورد بررسی نسبت به مدل‌های دیگر دارای برازش بهتری می‌باشد. بنابراین می توان این مدل را در دماهای مذکور برای خشک کردن کدو سبز با استفاده از جابجایی با هوای داغ توصیه نمود.

نتایج ضرایب نفوذ موثر رطوبت نشان داد که با افزایش دمای خشک‌کردن، ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش می‌یابد، که این امر توسط حرکت یا انتقال جرم از منافذ موئینه ماده غذایی توصیف می گردد. همانطور که از شکل ۴ مشاهده می گردد، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت بدست آمد. مقادیر  $D_{\text{eff}}$  به طور مشابه توسط سایر محققین برای سایر محصولات کشاورزی گزارش شده است. برای میوه چامپداک خشک شده،  $4/861 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  بود. برای برگ‌های نعناع ضرایب نفوذ موثر رطوبت در دماهای  $60^\circ\text{C}$  و  $70^\circ\text{C}$ ، به ترتیب  $1/19 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  و  $0/9648 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  بدست آمد. برای کیوی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر توسط خشک کردن با هوای داغ (دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و  $70^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد)

- Magee, T. R. A. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing*, 48: 524-531.
- Akpinar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73, 75-84.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT* 40: 1445-1451
- Babetto, A. C., Freire., F. B., Barrozo, M. A. S. & Freire, J. T. (2011). Drying of garlic slices: Kinetics and nonlinearity measures for selecting the best equilibrium moisture content equation. *Journal of Food Engineering* 107:347-352.
- Barrozo, M. A. S., Souza, A. M., Costa, S. M. & Murata, V. V. (2001). Simultaneous heat and mass transfer between air and soybean seeds in a concurrent moving bed. *International Journal of Food Science and Technology* 36 (4), 393-399.
- Chen, D., Zheng, Y. & Xifeng, Z.(2012). Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. *Bioresource Technology* 107:451-455.
- Chong, C. H., Lim Law, C., Cloke, M., Lik Hii, C., Chuah Abdullah, L. & Wan Daud, W. R. (2008). Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. *Journal of Food Engineering* 88: 522-527.
- Dermesonlouoglou, E. K., Giannakourou, M. C. & Taoukis, P. S. (2007). Kinetic modelling of the degradation of quality of osmo-dehydrofrozen tomatoes during storage. *Food Chemistry* 103: 985-993.
- Diamante, L. M. & Munro, P. A. (1991). Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *Int J Food Sci Technol*, 26-99.
- Doymaz, I. & Ismail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *food and bioproducts processing*. 8 9: 31-38.
- Evin, D. (2012). Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. *Food and Bioproducts processing*. 9 0: 323-332.
- Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*. 98: 461-470.
- Janjaia, S., Precopped, M., Lamlerta, N., Mahayotheeb, B., Balac, B. K., Nagle, D. M. & Müller, J. (2011). Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Food and Bioproducts processing*. 89: 194-201.
- Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337-344.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B. & Marinou-Kouris, D. (2003). Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*. 59: 391-403.
- Liu, Q. & Bakker-Arkema, F. W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: model development. *J. Agric. Eng. Res*, 66:275-280.
- Mota, C. L., Lucianoa, C., Diasa, A., Barroca, M. J. & Guinéa, R. P. F. (2010). Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation. *food and bioproducts processing* 8 8: 115-123.
- Neves, F. I. G., Vieira, M. C. & Silva, C. L. M. (2012). Inactivation kinetics of peroxidase in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) by heat and UV-C radiation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 13: 158-162.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L. & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Trans. ASAE*, 23: 1261-1271.
- Therdthai, N. & Zhou, W. (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*. 91: 482-489.
- Togrul, I. T. & Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58: 23-32.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B. & Wratten, F. T. (1985). Effect of drying air parameters on rice drying models. *Trans ASAE* 28:296-301.
- Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc. www.FAOSTAT.org
- Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy - Int. J*, 26: 457-465.
- Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A. & Cagatay, F. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *Proc. 7th Int. Cong. Agric. Mechanization and Energy*, May 26-27, (Ed. A. Bastancelik). Adana, Turkey.