

## منحنی‌های هم‌دمای دفع و جذب رطوبت گل‌گیاه علف‌چای

### *Hypericum perforatum* L.

حسین احمدی چناربن\*، سعید مینایی، علی‌رضا بصیری، مرتضی‌الاماسی و اکبر عرب حسینی\*\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: تهران- ورامین- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین- پیشوا، تلفن: ۰۹۱۲۳۸۹۳۱۴۵، پیام‌نگار:

h.ahmadi@iauvaramin.ac.ir

\*\* به‌ترتیب استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین- پیشوا، گروه زراعت و اصلاح نباتات؛ دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس؛ استادیار گروه مهندسی شیمی موسسه تحقیقات و پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران؛ استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران و دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران  
تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۶/۱۹

#### چکیده

علف‌چای *Hypericum perforatum* L. یکی از گیاهان دارویی است که مهم‌ترین ویژگی گونه‌های ایرانی آن، بالا بودن درصد هیپریرسین در برگ و گل‌های آن است. منحنی‌های هم‌دما، رابطه تعادلی بین فعالیت آبی و مقدار رطوبت محصول در دمای ثابت را نشان می‌دهند و آگاهی از آن‌ها در فرآیند انبارمانی و خشک کردن محصول ضروری است. در این تحقیق، رطوبت تعادلی هم‌دمای جذب و دفع گل‌گیاه علف‌چای در چهار دمای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۰/۱۱ تا ۰/۸۴ به روش وزن‌سنجی ایستا تعیین شد. از مدل‌های هندرسون، هالسی، ازوین، چانگ فاست و گاب برای برازش داده‌های حاصل از آزمایش استفاده شد. در تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت، به ترتیب، مدل‌های چانگ فاست و هالسی دارای بهترین برازش بودند.

#### واژه‌های کلیدی

رطوبت تعادلی، علف‌چای (*Hypericum perforatum* L.)، منحنی جذب، منحنی دفع

#### مقدمه

تعادلی به سمت صفر یا بی‌نهایت میل می‌کند، شیب منحنی بی‌نهایت می‌شود (Henderson, 1952). انتقال بخار آب بین ماده غذایی و محیط، بستگی به مقدار رطوبت و ترکیب ماده غذایی و نیز دما و رطوبت نسبی هوا دارد. در دمای ثابت، رطوبت موجود در ماده غذایی آنقدر تغییر می‌کند تا با رطوبت نسبی هوای محیط به حالت تعادل برسد. وزن ماده غذایی در صورت نگهداری در چنین شرایطی تغییر نخواهد کرد. در این حالت به رطوبت، رطوبت تعادلی گفته می‌شود و رطوبت نسبی هوای محیط پیرامون مواد غذایی را رطوبت نسبی تعادلی

در تحلیل فرآیندهای بیوشیمیایی، فیزیکی، و میکروبی مواد غذایی، داده‌های مربوط به منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع آب نقش مهمی دارند. این منحنی‌ها حاوی اطلاعاتی در مورد چگونگی برهم‌کنش آب با بافت ماده غذایی هستند. از خصوصیات بارز منحنی رطوبت تعادلی از دیدگاه ریاضی آن است که: ۱- وقتی رطوبت تعادلی صفر است، مقدار رطوبت نسبی تعادلی نیز صفر است ۲- در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد، رطوبت تعادلی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند ۳- وقتی رطوبت

همدمای دفع و مدل GAB بهترین برازش را در تعیین منحنی‌های همدمای جذب نشان داد. احمدی چناربن و همکاران (Ahmadi Chenarbon *et al.*, 2010) منحنی‌های همدمای دفع برگ گیاه دارویی علف چای *Hypericum perforatum* L. را در سه دمای ۴۰، ۵۰، و ۶۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۵ تا ۹۰ درصد به روش وزن‌سنجی ایستا محاسبه کردند. بر اساس آزمایش، مدل هالسی بهترین برازش را در تعیین منحنی همدمای دفع نشان داد. کاردیرو و همکاران (Cordeiro *et al.*, 2006) منحنی‌های همدمای جذب و دفع برگ‌های گیاه *Maytenus ilicifolia* را در سه دمای ۳۰، ۴۰، و ۵۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۱۱ تا ۸۵ درصد به روش وزن‌سنجی ایستا تعیین کردند. در این آزمایش مدل‌های چانگ فاست و هندرسون تامسون به ترتیب بهترین برازش را در تعیین منحنی‌های همدمای جذب و منحنی‌های همدمای دفع نشان دادند. کایا و کاهیاگلو (Kaya & Kahyaoglu, 2007) منحنی‌های همدمای جذب و دفع دو گیاه دارویی *Carthamus tinctorius* L و *Artemisia dracuncululus* L را در سه دمای ۱۵، ۲۵، و ۳۵ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۸ تا ۹۵ درصد به روش وزن‌سنجی ایستا تعیین کردند. براساس نتایج، مدل BET بهترین برازش را در تعیین منحنی‌های همدمای جذب و دفع این دو گیاه نشان داد. عرب حسینی و همکاران (Arabhosseini *et al.*, 2005) منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت ساقه و برگ گیاه ترخون را در دو واریته فرانسوی و روسی به روش وزن‌سنجی ایستا و با به‌کارگیری محلول اشباع نمک در سه دمای ۲۵، ۵۰، و ۷۰ درجه سلسیوس و در محدوده رطوبت نسبی ۵ تا ۹۰ درصد تعیین کردند. به کمک آنالیز رگرسیون غیر خطی، مدل هالسی بهترین برازش را در تعیین منحنی‌های همدمای جذب و دفع نشان داد. احمدی چناربن و همکاران (Ahmadi Chenarbon *et al.*,

1992). همدمای جذب و دفع، رابطه تعادلی بین فعالیت آبی و مقدار رطوبت محصول را در دمای ثابت نشان می‌دهند. به این ترتیب، با داشتن همدمای جذب و دفع رطوبت، امکان پیش‌بینی حداکثر رطوبتی فراهم می‌شود که محصول طی فرآیند خشک کردن و انبارداری می‌تواند حفظ کند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه ویژگی‌های مواد غذایی با یکدیگر متفاوت است، منحنی‌های هم‌دما برای هر ماده غذایی برای عملیات ذکر شده باید به صورت عملی به دست آیند (Carl & Denny, 1979). جمالی و همکاران (Jamali *et al.*, 2006a) منحنی‌های همدمای جذب و دفع برگ *Citrus reticulata* را در سه دمای ۳۰، ۴۰، و ۵۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۵ تا ۹۰ درصد و به روش وزن‌سنجی ایستا محاسبه کردند. پدیده هیستریزیس در محدوده دماهای آزمایش مشاهده شد و مدل‌های GAB و BET بهترین برازش را به ترتیب در تعیین منحنی‌های همدمای جذب و دفع نشان دادند. پارک و همکاران (Park *et al.*, 2002) منحنی‌های همدمای دفع برگ نعنا را در سه دمای ۳۰، ۴۰، و ۵۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۱۰ تا ۹۰ درصد به روش وزن‌سنجی ایستا مطابق با دستورالعمل COST90 به دست آوردند. به کمک رگرسیون غیرخطی مدل Peleg بهترین برازش را نشان داد. جمالی و همکاران (Jamali *et al.*, 2006b) منحنی‌های همدمای جذب و دفع برگ *Chenopodium ambrosioides* را در سه دمای ۳۰، ۴۰، و ۵۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۵ تا ۹۰ درصد به روش وزن‌سنجی ایستا به دست آوردند. در آزمایش مربوط به تعیین منحنی‌های همدمای جذب و دفع رطوبت، نمونه‌ها پس از گذشت ۱۲ روز به تعادل رطوبتی رسیدند. در محدوده دماهای آزمایش، پدیده هیستریزیس مشاهده نشد. به کمک رگرسیون غیر خطی، مدل هالسی بهترین برازش را در تعیین منحنی‌های

خلوص همه آنها ۹۸ درصد بود؛ محلول‌ها از نمایندگی شرکت مرک Merck در ایران خریداری شدند. برای جلوگیری از کپک زدگی نمونه‌ها در رطوبت‌های نسبی بالای ۵۰ درصد، از کریستال تیمول استفاده شد. علاوه بر وسایل متعارف آزمایشگاهی، این وسایل نیز به‌کار گرفته شدند: انکوباتور با حجم ۲۰۰ لیتر و دقت ۰/۳ درجه سلسیوس، ترازوی دیجیتالی (Saitorius – PT210) با دقت ۰/۰۰۱± گرم، آون خلأ (Gallen Kamp) با قابلیت ایجاد فشار مطلق تا ۱۵۰ میلی بار، دسیکاتور، ظروف شیشه‌ای حاوی محلول‌های نمک‌های اشباع، و ظرف‌های نگهداری نمونه‌های گیاهی.

### روش‌ها

متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری رطوبت تعادلی، روش‌های وزن‌سنجی، رطوب‌سنجی، و فشارسنجی هستند که در میان آنها روش وزن‌سنجی به دلیل ساده بودن، داشتن دقت بالا، و اینکه به تجهیزات پیچیده نیاز ندارد، کاربرد گسترده‌تری دارد. در این پژوهش از روش وزن‌سنجی ایستا مطابق با دستورالعمل COST90 استفاده شده است (Spiess & Wolf, 1983).

### آماده‌سازی مرحله جذب

پس از برداشت گیاه، گل‌ها از ساقه جدا و به قطعات ۱ میلی‌متری بریده شدند. حدود ۱۰۰ گرم از گیاه بین ۴ پتری‌دیش که قبلاً ضدعفونی شده بودند، تقسیم شد. پتری‌دیش‌ها به ظروف پلاستیکی که درون آنها تا نیمه از سیلکاژل پر شده بود منتقل گردیدند. ظروف پلاستیکی حاوی نمونه‌ها و سیلیکاژل در دمای اتاق و در جای تاریک قرار داده شدند و پس از گذشت ۵ روز، در فواصل زمانی یک روز در میان، پتری‌دیش‌ها توزین شدند و زمانی که اختلاف دو توزین متوالی حدود ۰/۰۰۱± گرم شد، عملیات توزین متوقف گردید. پتری‌دیش‌ها درون

(2011) منحنی‌های هم‌دمای دفع گل گیاه دارویی لاوندرا (*Lavandula officinalis* L) را در سه دمای ۳۰، ۴۰، و ۵۰ درجه سلسیوس و در محدوده فعالیت آبی ۱۱ تا ۸۵ درصد به روش وزن‌سنجی ایستا بررسی کردند. بر اساس آنالیز رگرسیون غیر خطی، مدل هالسی بهترین برازش را در تعیین منحنی‌های هم‌دمای دفع نشان داد.

گیاه علف چای *Hypericum perforatum* L یکی از گیاهان دارویی است و مهم‌ترین ویژگی گونه‌های ایرانی این گیاه، بالا بودن درصد ماده مؤثر آن یعنی هیپریسین در برگ و گل‌های آن است که نقش بسیار مهمی در درمان انواع بیماری‌ها دارد. سیرون و همکاران (Sirvent *et al.*, 2002) در اهمیت این گیاه می‌گویند تجارت آن در چند سال اخیر ۲۱۰ میلیون دلار در آمریکا و ۵۷۰ میلیون دلار در سراسر دنیا بوده است. بوت و همکاران (Buter *et al.*, 1998) می‌گویند، زراعت این گیاه در اروپای غربی گسترش یافته است؛ برای مثال در سال ۱۹۹۷ در آلمان سطح کشت این گیاه ۳۰۰ هکتار بود در حالی که در سال ۱۹۹۲ فقط ۱۵ هکتار بوده است. هدف از این تحقیق تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع رطوبت گل گیاه علف چای است.

### مواد و روش‌ها

#### مواد

گیاه علف چای *Hypericum perforatum* L مورد استفاده در این تحقیق از کلکسیون گیاهان دارویی مرکز تحقیقات گیاهان دارویی جهاد دانشگاهی در منطقه هلمجرود کرج، در ۱۶ کیلومتری بزرگراه کرج - قزوین تهیه شد. محلول‌های اشباع نمک مورد استفاده در این تحقیق برای تأمین رطوبت‌های نسبی مورد نیاز، عبارت بودند از: کلرید لیتیم، استات پتاسیم، کلرید منیزیم، کربنات پتاسیم، نترات منیزیم، کلرید سدیم، و کلرید پتاسیم که درجه

## آماده‌سازی محلول‌های اشباع نمک

برای ایجاد رطوبت نسبی ثابت در دامنه فعالیت آبی ۰/۱۱ تا ۰/۸۴، از هفت محلول نمک اشباع استفاده شد. فعالیت آبی نمک‌های اشباع در دماهای مختلف، در جدول ۱ ارائه شده است. برای حصول اطمینان از باقی ماندن محلول‌های نمک در حالت اشباع، این محلول‌ها در دمای ۸۰ درجه سلسیوس آماده‌سازی شدند. پس از کسب اطمینان از اشباع بودن محلول‌ها، که با تجمع بلور نمک در ته ظرف مشخص بود، در ظرف‌ها کاملاً بسته شد، و ظرف‌ها داخل آون با بالاترین دمای آزمایش یعنی ۷۰ درجه سلسیوس به مدت شش ساعت قرار داده شدند. پس از گذشت این مدت زمان، در صورت وجود نمک در ته ظرف، محلول اشباع بوده و گر نه دوباره نمک به محلول‌ها اضافه و مراحل بالا تکرار می‌گردید. پس از آماده‌سازی محلول‌های اشباع، ۱۵۰ میلی‌لیتر از هر محلول در ظروف شیشه‌ای آزمایش ریخته شد (Arabhosseini et al., 2005) گفتنی است که آزمایش‌ها در سه تکرار اجرا شد.

آون خلأ با دمای ۷۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۵۰ میلی‌بار به مدت ۸ ساعت قرار داده شدند تا اطمینان حاصل شود که به طور کامل خشک شده‌اند. آن‌گاه نمونه‌ها توزین شدند (Tsami et al., 1990).

## آماده‌سازی مرحله دفع

در این آزمایش نیز پس از برداشت گیاه، گل‌ها از ساقه جدا و به قطعات ۱ میلی‌متری بریده شدند. حدود ۱۰۰ گرم از گیاه بین ۴ پتری‌دیش که قبلاً ضد عفونی شده بودند، تقسیم شدند. پتری‌دیش‌ها به داخل ظروف پلاستیکی که درون آنها تا نیمه از آب مقطر پر شده بود منتقل و در دمای اتاق قرار داده شدند. به دلیل بالا بودن رطوبت نسبی در ظروف آماده‌سازی و احتمال کپک زدگی، از کریستال تیمول استفاده شد.

پس از گذشت پنج روز و در فواصل زمانی یک روز در میان، پتری‌دیش‌ها توزین شدند و این کار تا آنجا ادامه یافت که اختلاف دو توزین متوالی  $\pm 0.01$  گرم شد.

جدول ۱- فعالیت آبی نمک‌های اشباع در دماهای مختلف

فرمول نمک	$a_w$				منبع
	۴۰ درجه سلسیوس	۵۰ درجه سلسیوس	۶۰ درجه سلسیوس	۷۰ درجه سلسیوس	
LiCl	۰/۱۱۲۸	۰/۱۱۱	۰/۱۰۹۵	۰/۱۰۷۵	(Greenspan, 1977)
CH <sub>3</sub> COOK	۰/۲۰۶۰	۰/۱۸۹۲	۰/۱۷۴۷	۰/۱۶۲	(Labuza et al., 1985)
MgCl <sub>2</sub>	۰/۳۱۶۰	۰/۳۰۴۵	۰/۲۹۲۶	۰/۲۷۷۷	(Greenspan, 1977)
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۰/۴۳۳	۰/۴۲۶۸	۰/۴۲۱۱	۰/۴۱۵۸	(Labuza et al., 1985)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	۰/۵۰۵۹	۰/۴۸۸۴	۰/۴۷۲۵	۰/۴۵۸۰	(Labuza et al., 1985)
NaCl	۰/۷۵۰۶	۰/۷۴۷۳	۰/۷۴۵۷	۰/۷۴۴۳	(Labuza et al., 1985)
KCl	۰/۸۲۳۲	۰/۸۱۲	۰/۸۰۲۵	۰/۷۹۴۹	(Greenspan, 1977)

## تعیین رطوبت تعادلی

۱۵۰ میلی بار قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها توزین و به کمک رابطه ۱، رطوبت تعادلی آنها محاسبه شد (Tsami *et al.*, 1990).

$$X_e = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،

$X_e$  = مقدار رطوبت تعادلی (در صد و بر مبنای وزن خشک)؛  $M_w$  = وزن نمونه مرطوب (برحسب کیلوگرم)؛ و  $M_d$  = وزن نمونه خشک (بر حسب کیلوگرم) است.

### برازش داده‌ها

پس از به دست آوردن رطوبت تعادلی نمونه‌ها در هر یک از رطوبت‌های نسبی تعیین شده، برای برازش داده‌ها از روش رگرسیون غیرخطی استفاده شد و با استفاده از نرم افزارهای Excel 2003 و Matlab، مدل‌های زیر با داده‌ها برازش داده شدند.

ابتدا دمای مورد نظر در انکوباتورها تنظیم و ظرف‌های حاوی نمک‌های اشباع درون انکوباتورها قرار داده شدند. دمای هوای داخل یکی از ظرف‌ها به عنوان شاهد با دماسنج به صورت جداگانه اندازه‌گیری شد. پس از رسیدن دمای محلول‌های درون ظرف به دمای انکوباتور، ۱ گرم از نمونه گیاهی درون ظروف کوچک آلومینیمی ریخته شد و نمونه‌ها به صورت معلق در داخل ظروف حاوی محلول‌های نمک اشباع قرار داده شدند. پس از ۵ روز، اولین توزین نمونه‌ها آغاز شد و توزین‌های بعدی در فواصل زمانی ۳ روز در میان برنامه ریزی شدند (Arabhosseini *et al.*, 2005). هنگامی که اختلاف بین دو توزین متوالی  $\pm 0.001$  گرم شد آن نمونه به تعادل رطوبتی رسیده بود. به تعادل رسیدن نمونه‌ها حدود سه تا چهار هفته طول کشید. هر چه رطوبت نسبی محیط پایین‌تر یا دمای آزمایش بالاتر بود این زمان کمتر می‌شد. نمونه‌ها پس از آنکه به تعادل رطوبتی رسیدند، برای تعیین رطوبت نهایی، به مدت ۸ ساعت در آن خلأ با دمای ۷۰ درجه سلسیوس و فشار

جدول ۲- مدل‌های مورد استفاده در تحقیق برای برازش داده‌ها (Anon, 2003)

مدل	معادله
مدل هندرسون	$EMC = \left( -\frac{1}{C_1(T + C_2)} \ln(1 - ERH) \right)^{C_3}$
مدل هالسی	$EMC = \left( \frac{-\exp(C_1 + C_2 T)}{\ln(ERH)} \right)^{C_3}$
مدل ازوین	$EMC = (c_1 + c_2 T) \left( \frac{ERH}{1 - ERH} \right)^{C_3}$
مدل چانگ فاست	$EMC = \frac{1}{C_1} \ln \left( \ln(ERH) \frac{(C_2 - T)}{C_3} \right)$
مدل گاب GAB	$EMC = \frac{C_1 C_2 C_3 (ERH)}{[1 - C_2 (ERH)][1 - C_2 (ERH) + c_2 c_3 (ERH)]}$

$$C_2 = C_4 \exp\left(\frac{C_6}{RTa}\right) \quad (2)$$

$$C_3 = C_5 \exp\left(\frac{C_7}{RTa}\right) \quad (3)$$

که در آن،

$C_4, C_5, C_6, C_7$  = ضرایب معادله؛  $T_a$  = دما (کلوین)؛  
 $R = 8/314$  = ثابت عمومی گازها (بر حسب کیلوژول بر کیلومول درجه کلوین) است.

که در آنها،

$EMC$  = مقدار رطوبت تعادلی (بر پایه وزن خشک)؛  $ERH$

= رطوبت نسبی؛  $C_1, C_2, C_3$  = ضرایب معادلات؛  $T$  = دما (بر حسب سلسیوس) است.

ضرایب  $C_2$  و  $C_3$  در مدل GAB به کمک روابط ۲ و ۳ محاسبه شدند (Lahsasni et al. 2004)؛

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های به کار برده شده در تحقیق (Sun, 1999)

نام شاخص	معادله
SEE	$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (EMC - \overline{EMC})^2}{df}}$
MRD	$MRD = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{ EMC - \overline{EMC} }{EMC}$
RSS	$RSS = \sum_{i=1}^m (EMC - \overline{EMC})^2$
df	$df = m - n$

و گاب به کار گرفته شدند زیرا در بیشتر تحقیقات روی محصولات کشاورزی، برای برازش داده‌های آزمایشی از این مدل‌ها استفاده شده است. برای برازش داده‌ها از روش رگرسیون غیر خطی استفاده شد و برای تعیین مناسب بودن برازش، علاوه بر  $R^2$  از سه شاخص SEE، RSS، و MRD نیز استفاده شد.

مناسب‌ترین مدل، باید بیشترین  $R^2$  و حداقل مقدار بقیه شاخص‌ها را داشته باشد. جدول‌های ۴ و ۵، ضرایب مدل‌های برازش شده برای داده‌های آزمایشی هم دمای جذب و دفع را نشان می‌دهند.

که در آن،

$EMC$  = رطوبت به دست آمده از مدل (بر مبنای وزن خشک)؛  $EMC$  = رطوبت تعادلی به دست آمده از آزمایش (بر مبنای وزن خشک)؛  $m$  = تعداد مشاهدات برای هر مدل؛  $n$  = تعداد ثابت‌های مدل و  $df$  = درجه آزادی است.

## نتایج و بحث

### برازش داده‌ها

مدل‌های تجربی و تئوری متعددی برای برازش مقادیر آزمایشی رطوبت تعادلی مواد ارائه شده است. در این پژوهش، مدل‌های هندرسون، هالسی، ازوین، چانگ فاست،

جدول ۴- ضرایب مدل‌های برازش شده در تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذب گیاه علف چای

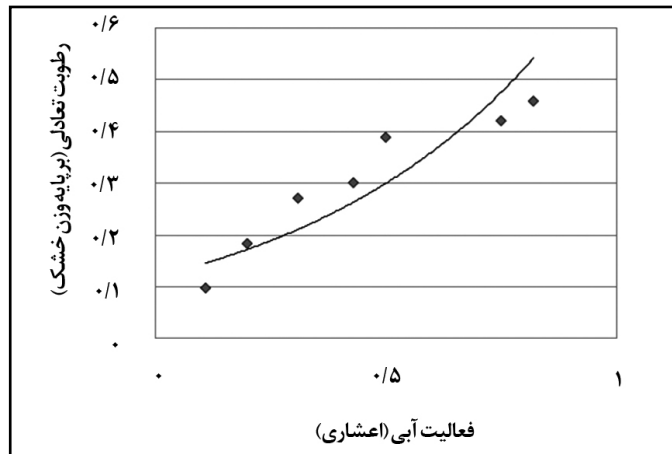
	Halsey		Oswin		Chung-Pfost		GAB		Henderson	
	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار
C <sub>1</sub>	-۹/۵۲۰	±۰/۵۶۱	۰/۳۷۲	±۰/۱۱۷	۱۳/۴۲۷	±۰/۲۴۱	۰/۴۳۲	±۰/۰۲۷	۴/۳۵۷	±۰/۱۴۷
C <sub>2</sub>	-۵/۲۲۳	±۰/۷۵۶	-۸/۲۴	±۰/۰۲۷	۱۷/۳۵۲	±۳/۶۵۷	-۳/۲۸	±۰/۰۵۴	۲/۲۹	±۰/۰۱۷
C <sub>3</sub>	۹/۴۹۲	±۰/۰۴۶	۵/۱۲۴	±۰/۱۵۴	۲۶۷/۲۳	±۲۳/۵۸۷	۱/۱۲۰	±۰/۰۵۱	۱/۱۰۴	±۰/۱۰۲
RSS	۰/۰۴۳		۰/۰۲۹		۰/۰۱۱		۰/۰۳۸		۰/۰۱۹	
SEE	۰/۰۲۷		۰/۰۳۷		۰/۰۱۴		۰/۰۲۵		۰/۰۳۱	
MRD	۰/۰۴۸		۰/۰۲۹		۰/۰۱۶		۰/۰۲۴		۰/۰۱۹	
R <sup>2</sup>	۰/۹۶		۰/۹۶		۰/۹۸		۰/۹۷		۰/۹۸	
Residual	Random		Random		Random		Random		Random	

جدول ۵- ضرایب مدل‌های برازش شده در تعیین منحنی‌های هم‌دمای دفع گیاه علف چای

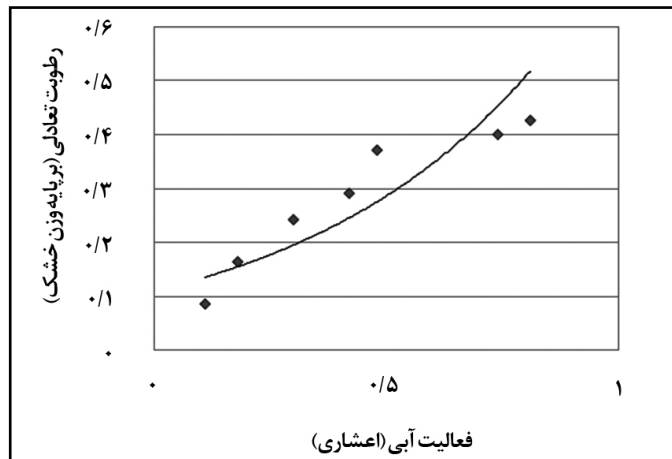
	Halsey		Oswin		Chung-Pfost		GAB		Henderson	
	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار	ضرایب برازش شده	انحراف معیار
C <sub>1</sub>	-۴/۲۵۶	±۰/۰۲۱	۰/۶۳۱	±۰/۱۷۶	۱۹/۰۳۵	±۰/۱۱۴	۰/۵۳۱	±۰/۱۲۶	۱/۳۰۲	±۰/۰۴۷
C <sub>2</sub>	-۱۱/۲۳۴	±۰/۰۷۶	-۲۵/۱۱۷	±۰/۴۳۷	۲۵/۱۷۹	±۰/۲۴۱	۲/۰۱	±۰/۰۳۰	۳/۰۹	±۰/۰۱۱
C <sub>3</sub>	۹/۳۰	±۰/۰۱۳	۸/۱۷۲	±۰/۲۸۱	۲۴۱/۱۲۳	±۰/۰۹۷	۱/۲۰	±۰/۰۲۱	۲/۱۴۴	±۰/۰۴۲
RSS	۰/۰۱۲		۰/۰۷۳		۰/۰۶۷		۰/۰۵۸		۰/۰۲۹	
SEE	۰/۰۳۱		۰/۰۵۷		۰/۰۷۸		۰/۰۲۸		۰/۰۳۹	
MRD	۰/۲۱		۰/۵۰		۰/۶۲		۰/۰۴۴		۰/۰۴۹	
R <sup>2</sup>	۰/۹۸		۰/۹۷		۰/۹۷		۰/۹۶		۰/۹۸	
Residual	Random		Random		Random		Random		Random	

ترتیب = ۰/۱۲، ۰/۰۳۱، و ۰/۲۱ دارای بهترین برازش در تعیین منحنی‌های هم‌دمای دفع شد. شکل‌های ۱ تا ۸ مقادیر رطوبت تعادلی در اثر تغییرات رطوبت نسبی محیط را در دماهای آزمایشی برای پدیده‌های دفع و جذب رطوبت نشان می‌دهند که به ترتیب با مدل‌های هالسی و چانگ فاست برازش شده‌اند.

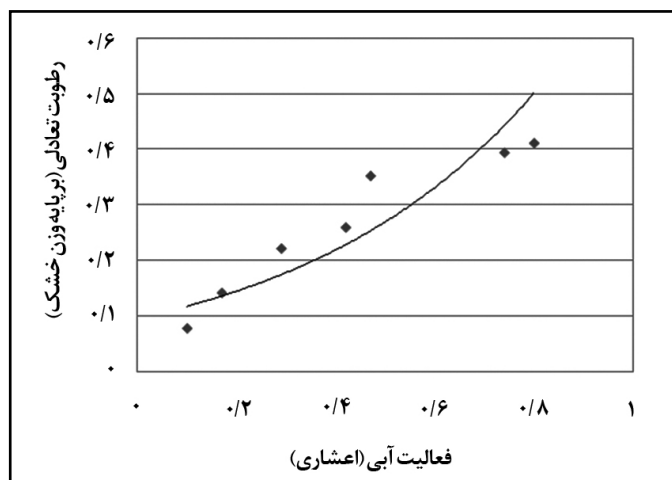
بر اساس برازش‌ها و با توجه به جدول ۴، در تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذب، مدل چانگ فاست به علت دارا بودن بیشترین مقدار  $R^2$  (= ۰/۹۸) و کمترین مقادیر RSS، SEE، و MRD (به ترتیب = ۰/۱۱، ۰/۰۱۴، و ۰/۰۱۶) دارای بهترین برازش بود. از سوی دیگر، با توجه به جدول ۵، مدل هالسی به علت دارا بودن بیشترین مقدار  $R^2$  (= ۰/۹۸) و کمترین مقادیر RSS، SEE، و MRD (به



شکل ۱- منحنی همدمای دفعی برازش شده با مدل هالسی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس



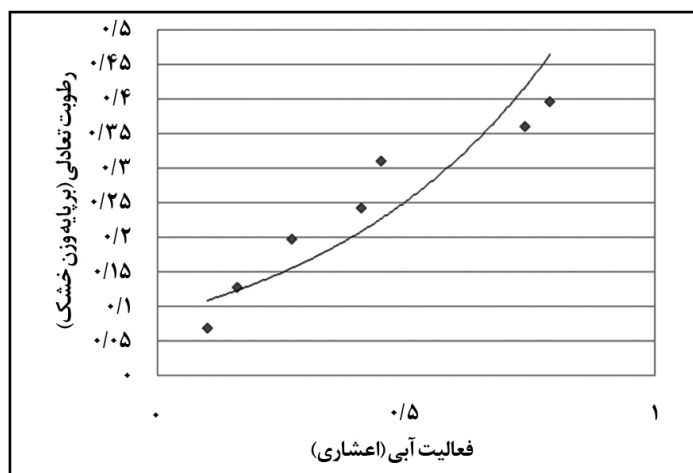
شکل ۲- منحنی همدمای دفعی برازش شده با مدل هالسی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس



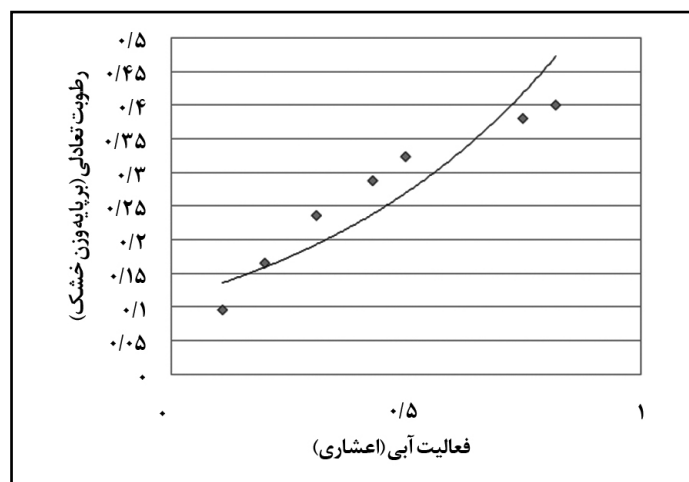
شکل ۳- منحنی همدمای دفعی برازش شده با مدل هالسی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس



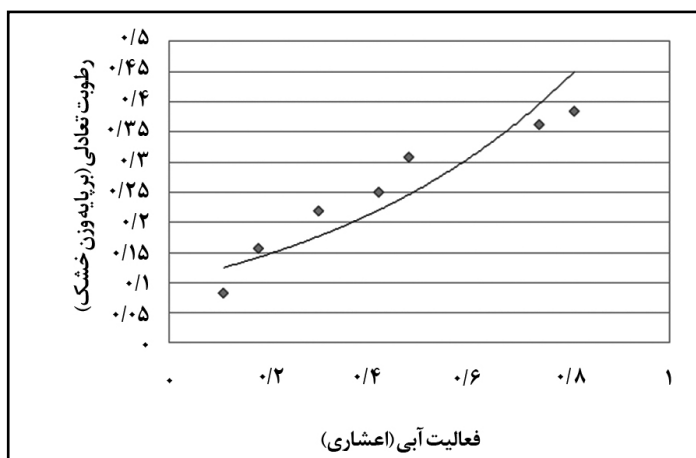
منحنی‌های هم‌دمای دفع و جذب رطوبت...



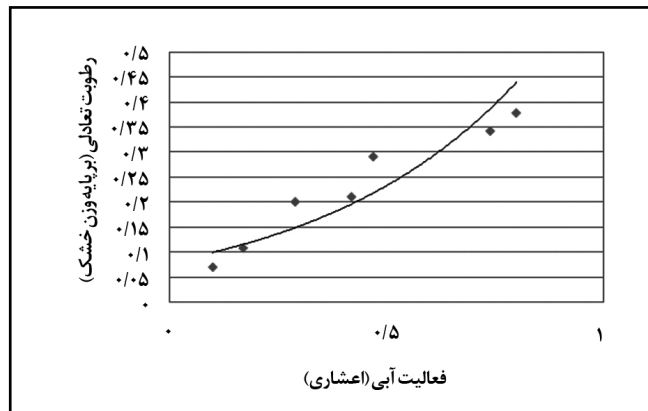
شکل ۴ - منحنی هم‌دمای دفعی برازش شده با مدل هالسی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس



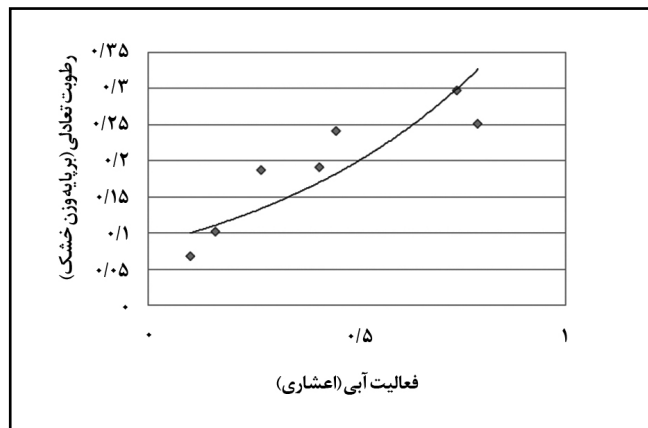
شکل ۵ - منحنی هم‌دمای جذبی برازش شده با مدل چانگ فاست در دمای ۴۰ درجه سلسیوس



شکل ۶ - منحنی هم‌دمای جذبی برازش شده با مدل چانگ فاست در دمای ۵۰ درجه سلسیوس

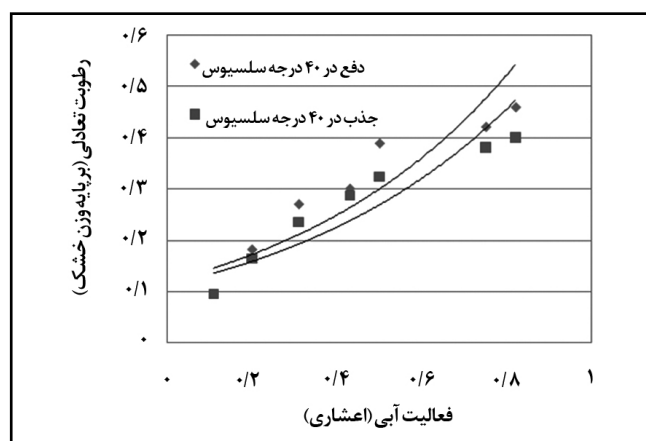


شکل ۷ - منحنی همدمای جذبی برازش شده با مدل چانگ فاست در دمای ۶۰ درجه سلسیوس



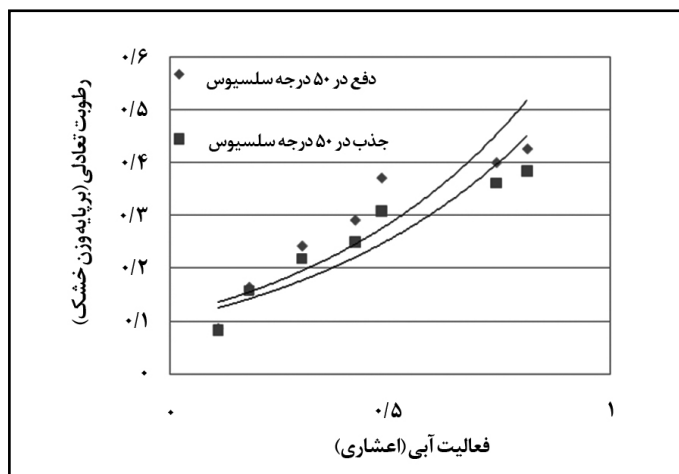
شکل ۸ - منحنی همدمای جذبی برازش شده با مدل چانگ فاست در دمای ۷۰ درجه سلسیوس

با مقایسه منحنی‌های همدمای دفعی و جذبی برازش شده در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده اند، معلوم شد که دو منحنی بر یکدیگر منطبق نیستند و رطوبت می‌شود. از پدیده فوق به عنوان پسماند یا هیستریزیس یاد می‌شود.

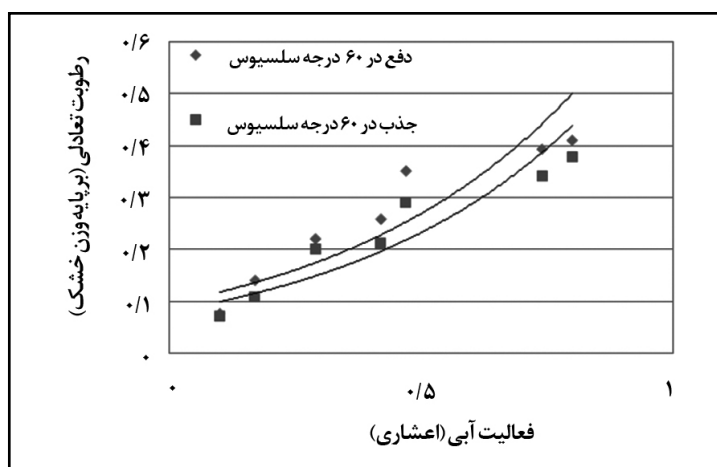


شکل ۹- پدیده پسماند بر اساس منحنی‌های جذب و دفع در دمای ۴۰ درجه سلسیوس

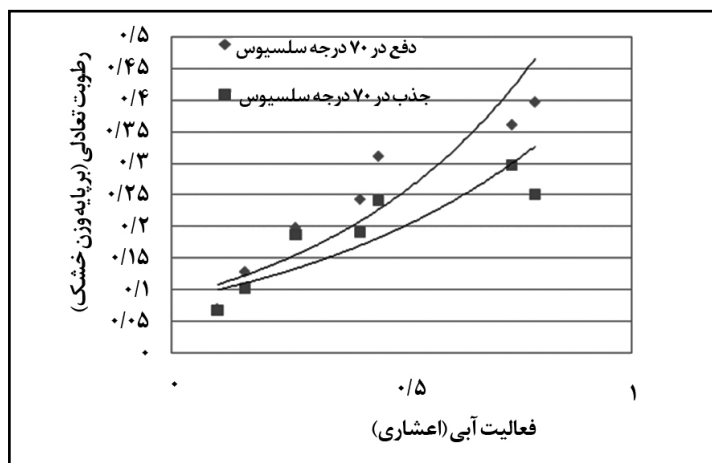
منحنی‌های هم‌دمای دفع و جذب رطوبت...



شکل ۱۰- پدیدهٔ پسماند بر اساس منحنی‌های جذب و دفع در دمای ۵۰ درجه سلسیوس



شکل ۱۱- پدیدهٔ پسماند بر اساس منحنی‌های جذب و دفع در دمای ۶۰ درجه سلسیوس



شکل ۱۲- پدیدهٔ پسماند بر اساس منحنی‌های جذب و دفع در دمای ۷۰ درجه سلسیوس

به فضاهای مجاور و سطح رویی گیاه مرتبط هستند. طی فرآیند جذب با افزایش رطوبت نسبی محیط، مجاری باریک شروع به پر شدن می‌کنند در حالی که حفره‌های داخلی هنوز خالی هستند. وقتی فشار جزئی بخار در هوا بیشتر از فشار بخار مایع در مجاری باشد رطوبت به داخل حفره‌ها حرکت می‌کند. برای دفع، حفره‌ها در ابتدا پر از مایع اشباع هستند. این مایع زمانی می‌تواند خارج شود که فشار هوای محیط بیرون کمتر از فشار بخار مایع داخلی مجاری باریک باشد. از آنجا که حفره‌ها و مجاری موئین قطره‌های متفاوت دارند بین فرآیند جذب و دفع رطوبت یکنواختی مشاهده نمی‌شود (Jamali *et al.*, 2006a)

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، مدل‌های چانگ فاست و هالسی، به ترتیب دارای بهترین برازش در تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذب و دفع هستند. همچنین، با مقایسه منحنی‌های هم‌دمای دفعی و جذبی برازش شده معلوم می‌شود که دو منحنی بر یکدیگر منطبق نیستند که به معنای پدیده پسماند یا هیستریزیس است.

### قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین و پیشوا که امکان اجرای چنین تحقیقی را فراهم کردند، سپاسگزاری می‌شود.

شکل‌های ۱ تا ۸ نشان می‌دهند که در دمای ثابت، مقدار رطوبت تعادلی با افزایش مقدار رطوبت نسبی (فعالیت آبی) افزایش می‌یابد. دلیل این امر اختلاف فشار بخار آب بین ماده و محیط است. یعنی رطوبت نسبی محیط هر قدر بالاتر می‌رود در حقیقت به فشار بخار آب اشباع نزدیک‌تر می‌شود و بین ماده و محیط اختلاف فشار کمتری مشاهده خواهد شد، از این‌رو رطوبت کمتری از دست می‌رود. قابل توجه است که این تغییرات در فعالیت‌های آبی بالای ۰/۶ بیشتر مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به وضعیت نمودارها معلوم می‌شود که در رطوبت نسبی مشخص، با افزایش دما، رطوبت تعادلی کاهش می‌یابد به طوری که رطوبت تعادلی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس بیشترین و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس (در رطوبت نسبی معین) کمترین مقدار را دارد. علت آن است که با افزوده شدن دمای ماده، تحرک و محدوده حرکتی مولکول‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین افزایش فاصله بین آنها سبب کاهش نیروی جاذبه بین مولکولی می‌شود. این امر سبب کاهش جذب آب در رطوبت نسبی معین و همزمان با بالا رفتن دما می‌شود. کاردیرو و همکاران (Cordeiro *et al.*, 2006) در تحقیقات خود روی برگ *Maytenus ilicifolia* نشان دادند که مدل چانگ فاست دارای بهترین برازش در تعیین منحنی‌های هم‌دمای جذب است. از سوی دیگر، دلایل متعددی برای پدیده هیستریزیس مطرح می‌شود. برخی معتقدند که در فضاهای بین سلول‌ها حفره‌هایی است که با مجاری باریکی

### مراجع

- Anon, 2003. Moisture relations of plant- based agricultural products. ASAE Standards 2003. Standards Engineering Practics Data (50<sup>th</sup> Ed) D 245.5: 538.
- Ahmadi Chenarbon, H., Minaei, S., Bassiri, A.R., Almassi, M. and Arabhosseini, A. 2010. Moisture desorption isotherms of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) leaves at three temperatures. Inter. J. Food. Agric. Environ. 8(3&4):132-135.

- Ahmadi Chenarbon, H., Movahed, S. and Hasheminia, S.M. 2011. Moisture desorption isotherms of *Lavandula officinalis* L. flowers at three temperatures. J. Ame. Sci. 17(6):757-761.
- Arabhosseini, A., Huisman, W., van Boxtel, A. and Mueller, J. 2005. Modeling of the equilibrium moisture content (EMC) of tarragon(*Artemisia dracunculus* L.). Inter. J. Food. Eng. 1(5).
- Buter, B., Orlacchio, C., Soldati, A. and Berger, K. 1998. Significance of genetic and environmental aspects in the field cultivation of *Hypericum perforatum* L. J. Planta Medica. 64, 431- 437.
- Carl, W.H. and Denny, C.D. 1979. Processing Equipment for Agricultural Products. 2<sup>nd</sup> Ed. The avi Pub. Co. Inc. London.
- Cordeiro, D.S., Raghavan, G.S.V., and Oliveira, W.P. 2006. Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves. J. Biosys. Eng. 94(2): 221-228.
- Greenspan, L. 1977. Humidity fixed point of binary saturated aqueous solutions. J. Research of National Bureau of Standards. 81A(1): 89-96.
- Henderson, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agri. 2, 29-33.
- Jamali, A., Kouhila, M., Ait Mohamed, L., Idlimam, A. and Lamharrar, A. 2006a. Moisture adsorption – desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures. J. Food. Eng. 77, 71-78.
- Jamali, A., Kouhila, M., Ait Mohamed, L., Idlimam, A. and Lamharrar, A. 2006b. Sorption isotherms of *Chenopodium ambrosioides* leaves at three temperatures. J. Food. Eng. 72, 77-84.
- Kaya, S. and Kahyaoglu, T. 2007. Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. J. Food. Eng. 78(2): 413-421.
- Labuza, T.P., Kaanane, A. and Chen, J.Y. 1985. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrates food. J. Food. Sci. 52, 201-206.
- Lahsasni, S., Kouhila, M. and Mahrouz, M. 2004. Adsorption- desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). Energy Conversion and Management. 45(2): 249-261.
- Okos, M.R., Narsimhan, G., Ingh, R.K., and Weitmauer, A.C. 1992. Food dehydration. In D.R. Heldman & D.B. Lund (Eds), Hand book of food engineering. New York: Marcel Dekker.
- Park, K.J., Vohnikova, Z. and Brod, F.P.R. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). J. Food. Eng. 51, 193-199.
- Sirvent, T.M., Walker, L., Vance, N. and Gibson, D.M. 2002. Variation in hypericins from wild populations of *Hypericum perforatum* L. In the Pacific Northwest of the U.S.A. Economic Botany. 56, 41-48.
- Spiess, W.E.L. and Wolf, W.F. 1983. The results of the COST 90 project on water activity. In R. Jowitt (Ed.), Physical properties of Foods. London: Applied Science Pub.
- Sun, D.W. 1999. Comparison and selection of EMC ERH isotherm equation for rice. J. Stored Products. Res. 35(3): 249-264.
- Tsami, E., Maroulis, Z.B., Morunos-Kouris, D. and Saravacos, G.D. 1990. Heat of sorption of water in dried fruits. Int. Food. Sci. Technol. 25, 350-359.

## Moisture Sorption Isotherms in St. John's Wort (*Hypericum Perforatum L.*) Flowers

H. Ahmadi Chenarbon\*, S. Minaei, A. R. Bassiri, M. Almassi and A. Arabhosseini

\* Corresponding Author: Academic Member, Department of Agriculture, Varamin- Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran. E-Mail: h.ahmadi@iauvaramin.ac.ir

Received: 6 December 2010, Accepted: 10 September 2011

Varieties of St. John's wort (*Hypericum perforatum L.*) native to Iran possess the largest percentage of hypericin in their leaves and flowers. Isotherm curves show the relationship between the relative humidity and moisture content of the plant at a constant temperature. It is essential to understand the isotherms curves for successful storage and drying of the plant. This study used adsorption and desorption to determine the moisture equilibrium of St. John's wort flowers at 40°, 50°, 60° and 70°C. Moisture content was determined to be 0.11-0.84 using the gravimetric static method. Five mathematical models (modified Henderson, modified Oswin, modified Halsey, modified Chung-Pfost and GAB equations) were used to compare the experimental data. The modified Halsey and Chung-Pfost models were found to be the best models for describing desorption and adsorption isotherms curves.

**Keywords:** Adsorption curve, Desorption curve, Equilibrium moisture content, St. John's wort