مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال یازدهم، شماره 1، بهار 1395، صفحات86-75

مدل‌سازی نقطه ذوب لغزشی چربی‌های اینتراستریفیه شده به روش شیمیایی به‌صورت تابعی از ترکیب اسیدهای چرب

محمدحسین نائلی[1]، جمشید فرمانی[2]، عزیزالله زرگران[3]

1- کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

2- نویسنده مسئول: استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
پست الکترونیکی: jamshid_farmani@yahoo.com

3- استادیار انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 94/5/24 تاریخ پذیرش: 94/8/11

چکیده

سابقه و هدف: نقطه ذوب لغزشی SMP (Slip Melting Point) یکی از ویژگی کیفی و عملکردی مهم چربی‌هاست. با این حال، روش‌های رایج اندازه‌گیری نقطه ذوب معمولاً زمان‌بر هستند. لذا در این پژوهش مدل‌های رگرسیونی جهت توصیف SMP چربی‌های اینتراستریفیه شده به‌صورت تابعی از ترکیب اسیدهای چرب‌شان ساخته شدند.

مواد و روش‌ها: مخلوط‌های روغن سویا و پالم استئارین با نسبت‌های مختلف تحت اینتراستریفیکاسیون شیمیایی قرار گرفتند و ترکیب اسیدهای چرب و نقطه ذوب آن‌ها مشخص شد. SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده به‌صورت تابعی از ترکیب اسیدهای چرب با کمک آنالیزهای رگرسیونی مدل‌سازی شد. شاخص‌های نیکوئی برازش مدل‌های مختلف ارزیابی شد و در انتها بهترین مدل برای پیش‌بینی SMP چربی‌های اینتراستریفیه شده معرفی گردید.

یافته‌ها: SMP مخلوط‌ها بعد از اینتراستریفیکاسیون شیمیایی به شکل معنی‌داری کاهش یافت ($p<0/05$). همبستگی پیرسون معنی‌دار بسیار خوب ($r>0/99$) بین تمامی اسیدهای چرب و SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین مشاهده شد ($p<0/01$). بنابراین از استراتژی‌های زیر برای مدل‌سازی SMP استفاده شد: مدل‌سازی SMP به عنوان تابعی از اسیدهای چرب پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک؛ مدل‌سازی SMP به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و اسیدهای چرب غیراشباع کل؛ مدل‌سازی SMP به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل. مدل‌های پیشنهادی جهت پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین دارای ضریب همبستگی (بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده) بزرگ‌تر از 0/99 و میانگین خطای مطلق به ترتیب کم‌تر از 0/52°C بود، که نشان دهنده قدرت پیش‌بینی بالای مدل‌ها می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج اعتبارسنجی نشان داد، مدل خطی چندگانه به‌صورت تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و غیراشباع کل و مدل گمپرتز به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل می‌توانند SMP چربی‌های مختلف اینتراستریفیه شده را به خوبی پیش‌بینی کند. این مدل‌ها می‌توانند در طراحی فرمولاسیون‌های چربی‌های اینتراستریفیه مفید باشند.

واژگان کلیدی: اینتراستریفیکاسیون شیمیایی، مدل‌سازی، نقطه ذوب لغزشی، ترکیب اسیدهای چرب

• مقدمه

با افزایش شواهد مربوط به اثرات سوء اسیدهای چرب ترانس بر سلامت انسان مانند افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی، مطالعات و قوانین نظارتی بر کاهش دریافت این ترکیبات از رژیم‌های غذایی تاکید دارند. برخلاف هیدروژناسیون که عامل اصلی تولید اسیدهای چرب ترانس است، فرآیند اینتراستریفیکاسیون منجر به تولید اسیدهای چرب ترانس نمی‌گردد. این فرآیند بهترین روش جهت تولید چربی‌های شکل‌پذیر بدون ترانس، به حساب می‌آید (5-1). اینتراستریفیکاسیون با بازآرایی مجدد اسیدهای چرب در ستون اصلی گلیسرول بدون تغییر ترکیب شیمیایی اسیدهای

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

چرب، باعث اصلاح خواص فیزیکی و عملکردی آن‌ها می‌شود (6، 5). در طول این فرآیند خصوصیات فیزیکوشیمیایی محصولات، نظیر ترکیب تری آسیل گلیسرول، نقطه ذوب، محتوای چربی جامد SFC (Solid fat content) و رفتار بلورینه شدن دچار تغییر می‌گردد. بر این اساس، اینتراستریفیکاسیون معمولاً با آنالیز تری آسیل گلیسرول و تعیین نقطه ذوب و SFC کنترل می‌شود (7).

طبق تعریف، نقطه ذوب دمایی است که در آن تغییر حالت ماده از جامد به مایع اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه چربی‌های طبیعی مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات مختلف هستند، تبدیل آن‌ها به شکل مایع کامل از طریق نرم شدن تدریجی انجام می‌شود. در نتیجه، این ترکیبات بر خلاف مواد خالص دارای نقطه ذوب دقیقی نمی‌باشند. نقطه ذوب از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی چربی‌ها جهت کنترل کیفی و ساخت محصولات چرب است. عواملی نظیر درجه غیراشباعیت، طول زنجیره کربنی، اشکال ایزومریک (سیس و ترانس) اسیدهای چرب و موقعیت آن‌ها در ستون اصلی گلیسرول و همچنین زمان و شرایط تمپرینگ بر نقطه ذوب چربی‌ها اثرگذار است (9، 8). روش‌های مختلفی نظیر نقطه ذوب وایلی (Wiley)، نقطه ذوب لغزشی SMP (Slip melting point)، نقطه نرم شدن (Softening point) و تکنیک‌های دستگاهی شامل نقطه ذوب متلر (Mettler melting point) و گرماسنجی پویشی افتراقی (Differential scanning calorimetry) جهت بررسی نقطه ذوب چربی‌ها موجود است (10). SMP به‌عنوان دمایی تعریف می‌شود که در آن چربی در یک لوله موئین باز شروع به حرکت می‌کند. در دمای SMP، چربی‌ها تقریباً حاوی 4% چربی جامد هستند. در واقع، در این روش ابتدای محدوده ذوبی اندازه‌گیری می‌شود. این روش اگرچه روش ساده‌ای است، اما نمونه‌ها حتماً به یک مرحله تمپرینگ طولانی مدت (16 ساعت) نیاز دارند (11، 9). در صنعت عملاً از مدت زمان کوتاه‌تری (1 ساعت) بدین منظور استفاده می‌شود، که نتایج در این شرایط دارای نوسان و همراه با خطای انسانی و عدم دقت لازم می‌باشد. در این زمینه، پیش‌بینی SMP بر طبق ترکیب اسیدهای چرب (که تحت تأثیر اینتراستریفیکاسیون قرار نمی‌گیرد و ابزار آنالیز آن (کروماتوگرافی گازی) بسیار معمول است) می‌توانند به صرفه‌جویی در زمان، کاهش خطای انسانی و به تولید و فرمولاسیون چربی‌های بازساخته کمک فراوانی کند.

ترکیب تری آسیل گلیسرول مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده خواص فیزیکی چربی‌ها است. توزیع اسیدهای چرب در داخل تری آسیل گلیسرول روغن‌ها و چربی‌های طبیعی به‌صورت انتخابی می‌باشد. در حقیقت اسیدهای چرب غیراشباع غالباً موقعیت *Sn-2* مولکول تری آسیل گلیسرول اکثر روغن‌ها و چربی‌ها را اشغال می‌کنند (تئوری توزیع 1 و 3 رندوم، 2 رندوم). بر این اساس، مخلوط‌های مختلف روغن‌ها/چربی‌های طبیعی، با وجود داشتن ترکیب اسید چرب یکسان، لزوماً ترکیب تری آسیل گلیسرول و به تبع آن خصوصیات فیزیکی مشابهی نخواهند داشت. به دنبال اینتراستریفیکاسیون شیمیایی، اسیدهای چرب به‌صورت تصادفی بین تری آسیل گلیسرول‌ها باز-توزیع می‌شوند (تئوری توزیع کاملاً تصادفی). واکنش در نهایت زمانی که همه تری آسیل گلیسرول‌های ممکن ساخته شد، به حالت تعادل می‌رسد (11، 8، 7). به دلیل توزیع کاملاً تصادفی اسیدهای چرب به دنبال اینتراستریفیکاسیون، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار تری آسیل گلیسرول‌ها تنها تابعی از ترکیب اسیدهای چرب مخلوط‌های اینتراستریفیه شده است (12). از نظر تئوری، اینتراستریفیکاسیون شیمیایی مجزای دو چربی مختلف با ترکیب تری آسیل گلیسرول متفاوت اما ترکیب اسید چرب یکسان، به ترکیب تری آسیل گلیسرول مشابه و به تبع آن خصوصیات فیزیکی یکسان منتج خواهد شد (7). تغییرات ساختار تری آسیل گلیسرول‌ها بر اثر فرآیند اینتراستریفیکاسیون، تغییرات نقطه ذوب را موجب می‌شود (13). از این رو، یک مدل ریاضی که به توصیف رابطهٔ بین SMP و ترکیب اسیدهای چرب بپردازد، می‌تواند در پیش‌بینی نتایج اینتراستریفیکاسیون مفید باشد.

تاکنون، مطالعات اندکی در زمینهٔ مدل‌سازی نقطه ذوب چربی‌های اینتراستریفیه شده منتشر شده است. Boyaci و همکاران (12) استفاده از یک تابع خطی چندگانه در جهت ارتباط SMP با مقادیر پنج اسید چرب (پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک) را مورد ارزیابی قرار دادند. آن-ها از روش حداقل مربعات برای محاسبه ضرایب ویژه هر یک از این اسیدهای چرب قبل و بعد از اینتراستریفیکاسیون استفاده و از این ضرایب و ترکیب اسید چرب روغن‌ها در جهت محاسبه SMP بهره گرفتند. مقایسه مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی SMP، رابطهٔ خطی بین این مقادیر قبل از اینتراستیرفیکاسیون را نشان نمی‌دهد (زیرا با توجه به توزیع انتخابی اسیدهای چرب در این مخلوط‌ها، ترکیب اسید چرب

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

تنها عامل مؤثر بر SMP این مخلوط‌ها نیست)، در حالی که SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده به دلیل توزیع کاملاً تصادفی اسیدهای چرب با دقت خوبی (r=0/956) قابل تخمین بود. فرمانی و همکاران (2) همبستگی خطی خوبی (R^2>0/99) را بین میزان کل اسیدهای چرب اشباع و SMP مخلوط‌های سه‌تایی سویای کاملاً هیدروژنه، روغن کانولا و آفتابگردان که به طریقهٔ آنزیمی اینتراستریفیه شده بودند، گزارش کردند. Fasina و همکاران (14) به یک رابطه خطی با همبستگی خوب (R^2>0/95) بین خصوصیات ذوبی (دمای شروع ذوب شدن، دمای پایان ذوب شدن، نقطه اوج دمای ذوب و آنتالپی ذوب) 12 گونه روغن گیاهی که توسط گرماسنجی پویشی افتراقی مورد بررسی قرار گرفته بودند و مقدار اسیدهای چرب تک غیراشباع و چند غیراشباع دست یافتند. نتایج تحقیقات آن‌ها یک همبستگی ضعیف (R^2=0/27) بین خصوصیات ذوبی و اسیدهای چرب اشباع را نشان می‌دهد که از این مسئله از واقعیت دور به نظر می‌رسد. ابراهیمی (10) از مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه (به منظور بررسی تأثیر همزمان اسیدهای چرب بر روی متغیر پاسخ) و چندین نوع از توابع سیگموئیدی (به‌صورت تابعی از اسیدهای چرب اشباع) جهت پیش‌بینی مقادیر SMP مخلوط‌های دوتایی پالم اولئین کاملاً هیدروژنه شده و روغن سویا اینتراستریفیه شده آنزیمی، استفاده کرده است. بر اساس مطالعات وی، مدل سیگموئیدی Gompertz به دلیل دارا بودن بیشترین ضریب تعیین (0/99) و کم‌ترین میانگین خطای مطلق (0/30 درصد) نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، مناسب‌ترین مدل پیشنهادی در راستای پیش‌بینی SMP چربی‌های اینتراستریفیه به‌صورت تابعی از ترکیب اسیدهای چرب می‌باشد.

هدف مطالعه حاضر دستیابی به یک مدل ریاضی ساده جهت پیش‌بینی SMP مخلوط‌های روغنی اینتراستریفیه شده بر اساس ترکیب اسیدهای چرب آن‌ها می‌باشد. در اولین بخش تحقیق، مخلوط‌های روغن سویا و پالم استئارین با نسبت‌های مختلف تهیه و تحت اینتراستریفیکاسیون شیمیایی قرار گرفت و ترکیب اسید چرب و SMP مخلوط‌ها تعیین شد. در دومین قسمت، کفایت ترکیب اسیدهای چرب در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده در جهت انتخاب متغیر مستقل به کمک ضرایب همبستگی پیرسون (Pearson correlation coefficients) مورد ارزیابی قرار گرفت، همچنین توانایی چند نوع مختلف از مدل‌های رگرسیونی در پیش‌بینی SMP نسبت به مقادیر آزمایشگاهی بررسی شد. در آخرین مرحله اعتبار مدل‌ها در تخمین SMP نمونه‌های اینتراستریفیه شده مربوط به سایر مطالعات نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها بهترین مدل در جهت پیش‌بینی SMP چربی‌های اینتراستریفیه شده به‌عنوان تابعی از ترکیب اسیدهای چرب معرفی شد.

• مواد و روش‌ها

مواد: روغن سویا (خنثی، رنگبری و بی بو شده) و پالم استئارین اهدایی از شرکت روغن گیاهی نوش آذر (تهران، ایران) بود. روغن‌ها پس از تهیه، تا زمان استفاده در دمای یخچال نگهداری شدند. متوکسید سدیم از شرکت مرک (آلمان) خریداری گردید. خاک رنگبر و خاک کمک صافی از شرکت روغن گیاهی پرتو دانه خزر (بهشهر، ایران) تهیه شد. سایر مواد شیمیایی با درجهٔ کروماتوگرافی یا تجزیه‌ای از شرکت مرک (آلمان) خریداری شدند.

تهیه مخلوط روغن‌ها: مخلوط‌های دوتایی روغن سویا: پالم استئارین با نسبت‌های10:90، 20:80، 30:70، 40:60، 50:50، 60:40، 70:30، 80:20، 90:10 و 100:00 (وزنی/وزنی) تهیه و جهت حذف کامل رطوبت، به مدت 15 دقیقه، تحت فشار مطلق 0/8 بار و همزدن توسط همزن مغناطیسی با دور 300 rpm مخلوط گردید. از مخلوط‌های حاصل جهت آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های اولیه نمونه-گیری شد.

اینتراستریفیکاسیون شیمیایی: ابتدا مخلوط های چربی در یک ارلن بوخنر در دمای 100 °C تحت خلا (0/2 بار مطلق) به مدت 20 دقیقه خشک شدند. اینتراستریفیکاسیون شیمیایی در یک ارلن بوخنر به وسیلهٔ 0/5 درصد (وزنی/وزنی) متوکسید سدیم پودری در دمای 90 °C، تحت خلا (0/2 بار مطلق)، همزنی 300 rpm و به مدت 1 ساعت صورت گرفت. واکنش با افزودن 2 درصد (وزنی/وزنی) محلول آبی 20 درصد اسید سیتریک، تحت همزنی 300 rpm و خلاء 0/2 بار مطلق به مدت 15 دقیقه غیر فعال شد. در ادامه جهت جداسازی کاتالیست، عملیات رنگبری به مدت 15 دقیقه با افزودن 1/5 درصد (وزنی/وزنی) خاک رنگبر به مخلوط روغنی و حرارت دادن (در 110°C) تحت خلاء و دور 300 rpm انجام گرفت. کاتالیست و خاک رنگبر با استفاده از قیف بوخنر و کاغذ صافی آغشته شده به کمک خاک صافی از روغن جدا شد (جهت حذف کامل صابون، عملیات رنگبری دو بار انجام شد). از روغن صاف شده جهت انجام مراحل بعدی استفاده گردید (4).

اندازه‌گیری ترکیب اسیدهای چرب: آماده‌سازی متیل استر اسیدهای چرب مطابق روش AOCS Ce 2-66 و آنالیز آن‌ها با

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

دستگاه کروماتوگرافی گاز-مایع ساخت شرکت Agilent (آمریکا) مدل 6100 و بر طبق روش AOCS 1Ce -91 انجام گردید (15). دستگاه مجهز به جایگاه تزریق دوپاره کننده (Splited) و آشکارساز یونیزاسیون شعله بود. نام ستون مویینه CP Sil 88، طول، قطر داخلی و ضخامت آن به ترتیب 100 متر، 0/25 میلی‌متر و 0/25 میکرومتر بود. نسبت دوپارگی (Split Ratio)40، گاز حامل نیتروژن و دمای آشکارکننده و جایگاه تزریق به ترتیب 280 و °C 240 بود. دمای راه‌اندازی ستون °C 198 و فشار سر ستون PSI 29/5 بود.

اندازه‌گیری نقطه ذوب لغزشی: اندازه‌گیری SMP بر اساس روش لولهٔ مویین باز AOCS Cc 3-25 انجام گرفت (15). نمونه‌ها تا °C10 بالاتر از نقطه ذوب‌شان مایع و سپس لولهٔ مویین در داخل ظرف نمونه فرو برده شد تا روغن حدود 1 سانتی‌متر از لوله مویین بالا برود. جدارهٔ بیرونی لولهٔ مویین حاوی نمونه با پنبه پاک گردید و سریعاً در بن ماری آب یخ فرو برده شد تا روغن جامد شود. سپس نمونه‌ها به مدت 16 ساعت در دمای °C 1 ± 6 قرار گرفت. پس از گذشتن این زمان لوله مویین‌ها به دماسنج متصل و در یک بشر 600 میلی‌لیتری که حاوی آب با دمای حداقل °C10 کمتر از نقطه ذوب احتمالی نمونه، قرار داده شد. زمانی که اولین لغزش چربی به سمت بالا در لولهٔ مویین مشاهده گردید، به‌عنوان SMP نمونه در نظر گرفته شد.

مدل‌سازی و تجزیه تحلیل آماری: به منظور بررسی همبستگی بین SMP و ترکیب اسیدهای چرب، ضرایب همبستگی پیرسون با استفاده از نسخه 21 نرم‌افزار SPSS (نیویورک، آمریکا) محاسبه شد. مدل‌سازی SMP به‌صورت تابعی از اسیدهای چرب با کمک آنالیزهای رگرسیونی و در مورد توابع سیگموئیدی و درجه 2 توسط نسخه 12 نرم‌افزار Sigma Plot (سیستات، آمریکا) و در رابطه با توابع خطی چندگانه به وسیلهٔ نسخه 21 نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. در راستای سنجش توانایی و دقت مدل‌های ساخته شده، برازش بین داده‌های تجربی و آزمایشگاهی با بهره‌گیری از معیارهای سنجش دقت از جمله ضریب همبستگی (r)، ضریب تعیین (R^2)، خطای استاندارد SE (Standard Error) با استفاده از نرم‌افزار SigmaPlot و همچنین میانگین خطای مطلق MAE (Mean Absolute Error) توسط نسخه 10 نرم‌افزار STATISTICA (تلسا، آمریکا) محاسبه و ارزیابی شدند. در انتها جهت اعتباربخشی به مدل‌های ساخته شده، مقادیر SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده مختلف (از کارهای دیگران) به کمک مدل پیشنهادی پیش‌بینی و با مقادیر واقعی آزمایشگاهی‌شان مورد برازش قرار گرفت. آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون آنالیز واریانس یک طرفه در سطح $p<0/05$ و با استفاده از نرم‌افزار 21 نرم‌افزار SPSS انجام شد.

• یافته‌ها

ترکیب اسیدهای چرب و نقطه ذوب لغزشی: به طور کلی ترکیب اسیدهای چرب از اصلی‌ترین فاکتورهای مؤثر بر نقطه ذوب چربی‌ها می‌باشد. جدول 1 ترکیب اسیدهای چرب و SMP مخلوط‌ها قبل و بعد از اینتراستریفیکاسیون شیمیایی را نشان می‌دهد. پالمتیک و اولئیک اسید به ترتیب با 52/9 و 30/1 درصد اسیدهای چرب غالب پالم استئارین و لینولئیک اسید (به‌عنوان یک اسید چرب ضروری) و اولئیک اسید به ترتیب با 53/3 و 22 درصد اسیدهای چرب غالب روغن سویا بودند (جدول 1). افزودن روغن سویا به پالم استئارین باعث افزایش محتوای اسیدهای چرب چند غیراشباع گردید که این مسئله در ساخت یک چربی سالم دارای جذابیت است (16). اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک بیش از 97 درصد از کل اسیدهای چرب مخلوط‌ها را تشکیل می‌دادند (جدول 1). بر اساس نتایج جدول 1، بنابر انتظار با افزایش نسبت پالم استئارین در مخلوط‌ها، به دلیل افزایش تری آسیل گلیسرول‌های سه‌اشباعی (با نقطه ذوب بالا)، SMP نیز افزایش یافت ($p<0/05$). اینتراستریفیکاسیون به شکل معنی‌داری باعث کاهش SMP (°C10-2) مخلوط‌ها شد ($p<0/05$). با افزایش سهم پالم استئارین در مخلوط‌های روغنی با یک روند کلی اختلاف SMP قبل و بعد از اینتراستریفیکاسیون کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که مخلوط‌هایی که دارای درصد بالاتری از پالم استئارین هستند، اختلاف SMP قبل و بعد کمتری را نسبت به مخلوط‌های حاوی روغن سویای بیشتر، از خود نشان می‌دهند.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

جدول 1. ترکیب اسیدهای چرب و نقطه ذوب لغزشی مخلوط‌های اینتراستریفیه شده شیمیایی روغن سویا: پالم استئارین

مخلوط‌ها	ترکیب اسید چرب (%)								SMP (°C)	
	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	SFA	UFA	PUFA	قبل	بعد
PS:SBO										
0:100	11/6±0/03	4/5±0/01	22/0±0/05	53/3±0/07	7/3±0/03	16/2	83/6	60/6	-	-
10:90	15/2±0/02	4/6±0/02	22/8±0/04	48/7±0/05	6/6±0/02	20/7	79/1	55/3	33/7[a]	24/6[b]
20:80	19/4±0/04	4/8±0/02	23/8±0/02	44/2±0/03	5/8±0/02	25/2	74/8	50/1	37/1[a]	27/4[b]
30:70	24/0±0/02	4/9±0/03	24/4±0/03	39/6±0/03	5/1±0/02	29/6	70/1	44/8	39/1[a]	30/6[b]
40:60	28/0 ±0/02	5/1±0/02	25/2±0/04	35/1±0/02	4/4±0/01	34/1	65/6	39/5	42/5[a]	33/3[b]
50:50	32/4±0/04	5/3±0/04	26/0±0/02	30/5±0/05	3/7±0/02	38/5	61/1	34/2	44/6[a]	36/3[b]
60:40	38/4±0/03	5/4±0/03	26/90±0/05	26/0±0/02	3/0±0/03	43/0	56/6	29/0	47[a]	38/8[b]
70:30	40/5±0/02	5/6±0/02	27/7±0/06	21/4±0/02	2/2±0/06	47/4	52/1	23/7	47/8[a]	41.6[b]
80:20	44/6±0/07	5/8±0/03	28/5±0/02	16/9±0/03	1/5±0/03	51/9	47/6	18/4	48/9[a]	44/4[b]
90:10	48/7±0/04	5/9±0/05	29/3±0/03	12/3±0/06	0/8±0/02	56/3	43/1	13/2	50/0[a]	47/9[b]
100:0	52/9±0/06	6/1±0/03	30/1±0/05	7/8±0/02	0/1±0	60/8	7/9	38/6	52/8[a]	49/8[b]

نتایج به‌صورت میانگین سه تکرار± انحراف معیار بیان شده است. در هر ردیف، داده‌های نشان داده شده با بالانویس‌های متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در $p<0/05$ می‌باشند؛ PS، پالم استئارین؛ SBO، روغن سویا؛ SFA، اسیدهای چرب اشباع (مجموع 14:0، 16:0 و 18:0)؛ UFA، اسیدهای چرب غیراشباع (مجموع 18:1، 18:2 و 18:3)؛ PUFA، اسیدهای چرب چند غیراشباع (مجموع 18:2 و 18:3)؛ SMP، نقطه ذوب لغزشی.

همبستگی نقطه ذوب لغزشی و ترکیب اسیدهای چرب: به منظور تشخیص متغیرهایی که دارای همبستگی بیشتر با SMP هستند، ضرایب همبستگی پیرسون بین SMP و اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک، لینولنیک، اسیدهای چرب غیراشباع کل و اسیدهای چرب اشباع کل محاسبه شد (جدول 2). ضریب همبستگی پیرسون ارتباط اساسی میان متغیرها را به تصویر می‌کشد. این پارامتر بین 1- و 1 است. اگر دو متغیر تمایل به افزایش با هم را داشته باشند، ضریب همبستگی آن‌ها مثبت خواهد بود. در مقابل، اگر یکی از متغیرها تمایل به افزایش به دنبال کاهش دیگری را داشته باشد، در این شرایط ضریب همبستگی منفی است (7). بر اساس نتایج جدول 2، تمامی متغیرهای مستقل مورد ارزیابی همبستگی معنی‌دار بسیار خوبی ($r>0/99$) را با متغیر پاسخ (SMP) نشان می‌دهند ($p<0/01$) و همه آن‌ها قابلیت بالایی در انتخاب به‌عنوان متغیر مستقل دارند. متغیرهای پالمتیک، استئاریک و اسیدهای چرب اشباع کل دارای نقطه ذوب بالایی هستند و بنابر انتظار یک همبستگی مثبت معنی‌دار بین این اسیدهای چرب با SMP مشاهده شد (جدول 2). بر خلاف اسیدهای چرب اشباع، متغیرهای اولئیک، لینولئیک، لینولنیک و اسیدهای چرب غیراشباع کل با توجه به اینکه دارای نقطه ذوبی کمتر از 5°C هستند، اثری منفی بر SMP داشتند (جدول 2).

جدول 2. ضرایب همبستگی پیرسون بین نقطه ذوب لغزشی و ساختار اسیدهای چرب مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین

	SMP	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	SFA	UFA	PUFA
SMP	1	0/998[a]	0/998[a]	0/998[a]	-0/998[a]	-0/998[a]	0/998[a]	-0/997[a]	-0/998[a]
16:0	0/998[a]	1	1/000[a]	0/999[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]
18:0	0/998[a]	1/000[a]	1	1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]
18:1	0/998[a]	0/999[a]	1/000[a]	1	-1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]
18:2	-0/998[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1	1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	1/000[a]
18:3	-0/998[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	1	-1/000[a]	1/000[a]	1/000[a]
SFA	0/998[a]	1/000[a]	1/000[a]	1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1	-1/000[a]	-1/000[a]
USFA	-0/997[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	1/000[a]	-1/000[a]	1	1/000[a]
PUFA	-0/998[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	1/000[a]	-1/000[a]	1/000[a]	1

بالانویس a نشان دهنده معنی‌داری همبستگی در سطح 0/01 می‌باشد؛ SFA، اسیدهای چرب اشباع (مجموع 14:0، 16:0 و 18:0)؛ UFA، اسیدهای چرب غیراشباع (مجموع 18:1، 18:2 و 18:3)؛ PUFA، اسیدهای چرب چند غیراشباع (مجموع 18:2 و 18:3)؛ SMP، نقطه ذوب لغزشی.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

مدل‌سازی نقطه ذوب لغزشی به‌صورت ترکیب اسیدهای چرب: با توجه به این که SMP با یکایک اسیدهای چرب همبستگی بسیار بالایی نشان داد (جدول 2) از استراتژی‌های زیر برای مدل‌سازی استفاده شد: 1- مدل‌سازی SMP به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب پالمیتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک 2- مدل‌سازی SMP به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و اسیدهای چرب غیراشباع کل 3- مدل‌سازی SMP به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل.

مدل‌سازی نقطه ذوب لغزشی به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک: از آن جا که اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک تقریباً تمام ترکیب اسیدهای چرب مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین را به خود اختصاص داده‌اند (جدول 1)، پس می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی این مخلوط‌ها تا اندازه زیادی متأثر از نسبت این اسیدهای چرب است. در نتیجه می‌توان از رگرسیون‌های خطی چندگانه (چند متغیره) جهت بررسی تأثیر همزمان همه این اسیدهای چرب بر SMP بهره گرفت. به کمک رگرسیون‌های چندگانه می‌توان همزمان به تحلیل و بررسی چندین متغیر مختلف پرداخت. رگرسیون چندگانه در حقیقت، ارتباط بین یک سری از متغیرهای پیشگو را با متغیر پاسخ مورد نظر بیان می‌کند (17). رابطهٔ بین متغیرهای مستقل اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک و متغیر وابسته SMP به کمک توابع خطی چندگانه به شکل زیر می‌باشد:

معادله 1

$$SMP = a(P)+b(S)+c(O)+d(L)+e(Ln)+f$$

در رابطهٔ بالا a، b، c، d و e ضرایب رگرسیون و f مقدار ثابت رگرسیون می‌باشند که مسئول برآورد متغیر پاسخ هستند. P، S، O، L و Ln به ترتیب درصد اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک است. ضرایب و شاخص‌های نیکوئی برازش مدل در جدول 3 ارائه شده است. این مدل با توجه به ضریب تعیین بالا (0/999) و میانگین خطای مطلق کم (0/13 °C) بالاترین توانایی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین را بین تمام مدل‌های پیشنهادی از خود نشان می‌دهد (جدول 3).

مدل‌سازی نقطه ذوب لغزشی به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و اسیدهای چرب غیراشباع کل: یک همبستگی بسیار قوی (r=1/0) بین اسیدهای چرب غیراشباع و اشباع بر قرار است (جدول 2). از سوی دیگر، به دلیل اینکه مجموع اسیدهای چرب موجود در چربی 100درصد است، افزایش و یا کاهش هر یک بر مقادیر سایر آن‌ها تأثیرگذار خواهد بود. در واقع، توزیع آماری اولئیک، لینولئیک، لینولنیک و اسیدهای چرب غیراشباع کل کاملاً تحت تأثیر مقادیر اسیدهای چرب اشباع کل، پالمتیک و استئاریک می‌باشد. در نتیجه می‌توان با بهره‌گیری از متغیرهای مستقل ترکیبی اسیدهای چرب اشباع کل و اسیدهای چرب غیراشباع کل که به ترتیب مجموعی از تمامی اسیدهای چرب غیراشباع و اشباع می‌باشند، مدلی ساده‌تر ارائه داد. اثر متغیرهای مستقل اسیدهای چرب اشباع کل و اسیدهای غیراشباع کل بر SMP را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

معادله 2

$$SMP = a(SFA)+b(UFA) + f$$

که در این رابطه a و b ضرایب رگرسیون و f مقدار ثابت رگرسیون می‌باشند. SFA و UFA به ترتیب درصد اسیدهای چرب اشباع کل و اسیدهای چرب غیراشباع کل می‌باشد. ضرایب و شاخص‌های نیکوئی برازش مدل در جدول 3 ارائه شده است. بر اساس جدول 3، مدل قدرت بالایی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین دارد (به ترتیب با ضریب تعیین و میانگین خطای مطلق 0/998 و 0/21 °C).

مدل‌سازی نقطه ذوب لغزشی به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل: مطالعات گذشته نشان می‌دهد، SFC و به تبع آن SMP چربی‌ها می‌توانند به شکل بهتری توسط اسیدهای چرب اشباع توصیف شود (19، 18، 2). پالمیتیک و استئاریک اسید اسیدهای چرب اشباع اصلی مخلوط‌ها بودند و مقدار آن‌ها به ترتیب در محدوده 15/2-52/9 و 4/6-6/1 درصد قرار داشت (جدول 1). به منظور ساده‌سازی مدل و همچنین اعمال تأثیر همزمان هر دو اسید چرب پالمتیک و استئاریک، اسیدهای چرب اشباع کل (که در عمل مجموعی از این دو اسید چرب است) به‌عنوان متغیر مستقل ترکیبی یگانه انتخاب گردید. از این رو SMP به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل ($SMP_{f(SFA)}$) به کمک توابع خطی ساده (معادله 3)، درجه 2 (معادله 4) و دو تابع سیگموئیدی سیگموئید (معادله 5) و گمپرتز (معادله 6) مدل‌سازی شد. ضرایب همبستگی و شاخص‌های نیکوئی برازش این مدل‌ها در جدول 3 ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول 3، تمامی این مدل‌های یگانه (تک متغیره) توانایی خوبی در پیش‌بینی SMP

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

$_{f(SFA)}$ از خود نشان دادند. در بین مدل‌های یگانه، مدل سیگموئیدی گمپرتز دارای بهترین شاخص‌های نیکوئی برازش (به ترتیب با ضریب همبستگی و میانگین خطای مطلق 0/999 و 0/21°C) بود (جدول 3). تأثیر اسیدهای چرب اشباع کل به‌عنوان متغیر مستقل یگانه بر SMP را به کمک تابع خطی ساده می‌توان به شکل مدل زیر ارائه داد:

معادله 3 $SMP = a(SFA) + c$

در این معادله a، c و SFA به ترتیب ضریب رگرسیون (شیب خط رگرسیون)، ثابت رگرسیون (عرض از مبدأ) و درصد اسیدهای چرب اشباع کل می‌باشد.

ارتباط بین SMP و اسیدهای چرب اشباع کل را به کمک تابع درجه 2 به شکل زیر می‌باشد:

معادله 4 $SMP = a(SFA)^2 + b(SFA)+c$

در معادله بالا a و b ضرایب رگرسیون و c و SFA به ترتیب ثابت رگرسیون و درصد اسیدهای چرب اشباع کل می‌باشد.

SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده به‌صورت تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل به کمک دو تابع سیگموئیدی سیگموئید (معادله 5) و گمپرتز (معادله 6) به‌صورت زیر قابل برازش است:

معادل5

$$SMP = \frac{a}{1+e^{-(\frac{SFA-c}{b})}}$$

معادله6

$$SMP = ae^{-e^{-(\frac{SFA-c}{b})}}$$

a؛ مجانب بالا، b؛ عرض از مبدأ، c؛ نرخ برش، e؛ عدد اویلر (e=2.71828) و SFA؛ درصد اسیدهای چرب اشباع کل می‌باشد.

جدول 3. ضرایب و شاخص‌های نیکوئی برازش مدل‌های پیشنهادی در جهت پیش‌بینی نقطه ذوب لغزشی مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین به‌صورت تابعی از ترکیب اسیدهای چرب

مدل‌های پیشنهادی	ضرایب همبستگی مدل‌ها						شاخص‌های نیکوئی برازش مدل‌ها			
	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	r	R^2	SE	MAE
مدل‌های خطی چندگانه										
تابعی از P، S، O، L و Ln	0/706	14/213	-0/327	-9/333	62/17	0	0/999	0/999	0/25	0/13
تابعی از SFA و UFA	-0/58	-1/201	-	-	-	131/937	0/999	0/998	0/29	0/21
مدل‌های یگانه $SMP_{f(SFA)}$										
خطی ساده	0/6356	-	11/5698	-	-	-	0/999	0/997	0/33	0/27
درجه 2	-0/0006	0/6855	10/6514	-	-	-	0/997	0/995	0/68	0/52
سیگموئیدی سیگموئید	71/9064	27/3726	38/3114	-	-	-	0/999	0/998	0/32	0/24
سیگموئیدی گمپرتز	91/7998	51/986	34/8922	-	-	-	0/999	0/999	0/30	0/21

P، پالمتیک اسید؛ S، استئاریک اسید؛ L، لینولئیک اسید؛ Ln، لینولنیک اسید؛ SFA، اسیدهای چرب اشباع (مجموع 14:0، 16:0 و 18:0)؛ UFA، اسیدهای چرب غیراشباع (مجموع 18:1، 18:2 و 18:3)؛ r، ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده؛ R^2، ضریب تعیین؛ SE، خطای استاندارد؛ MAE، میانگین خطای مطلق؛ $SMP_{f(SFA)}$، نقطه ذوب لغزشی به‌صورت تابعی از اسیدهای چرب اشباع.

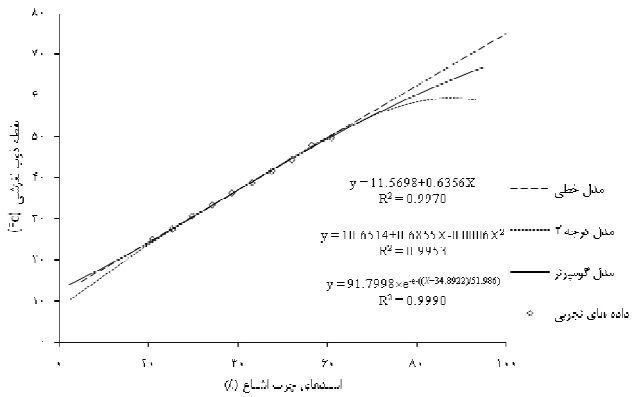
• بحث

همان‌گونه که در بخش یافته‌ها بیان شد، SMP مخلوط‌ها بعد از اینتراستریفیکاسیون کاهش یافت (جدول 1). این نتایج مطابق با یافته‌های قبلی است (21، 20، 4). دلیل کاهش SMP به دنبال اینتراستریفیکاسیون، کاهش تری آسیل گلیسرول‌های سه اشباعی با نقطه ذوب بالا و افزایش مقدار تری آسیل گلیسرول‌های دواشباعی-تک غیراشباعی و تک اشباعی-دو غیراشباعی عنوان شده است (21). همان‌گونه که عنوان شد با افزایش سهم پالم استئارین در مخلوط‌های روغنی با یک روند کلی اختلاف SMP قبل و بعد از اینتراستریفیکاسیون کاهش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که با افزایش سهم پالم استئارین در فرمول و متعاقباً افزایش تری آسیل گلیسرول‌های سه‌اشباعی، درصد کاهش

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

تری آسیل گلیسرول‌های سه‌اشباعی در اثر اینتراستریفیکاسیون کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر میزان اختلافات SMP بین پروفیل تری آسیل گلیسرول قبل و بعد اینتراستریفیکاسیون در مخلوط‌هایی با پالم استئارین بالاتر، کمتر است، چون با افزایش سهم پالم استئارین در مخلوط‌ها محتوای تری آسیل گلیسرول‌های سه‌اشباعی زیاد شده و این باعث می‌شود بعد از واکنش هرچند تعداد این نوع از تری‌آسیل گلیسرول‌ها کاهش می‌یابد، اما به دلیل اینکه هنوز هم مقدار زیادی از آن‌ها در مخلوط اینتراستریفیه شده موجود است، بعد از فرآیند اختلاف نقطه ذوب کمتری مشاهده شود (23، 22).

به منظور مقایسهٔ و ارزیابی توانایی مدل‌های یگانه در توصیف منحنی SMP $_{f(SFA)}$ مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین، داده‌های تجربی با مدل‌های خطی، درجه 2 و سیگموئیدی گمپرتز مورد برازش قرار گرفت (شکل 1). همان‌گونه که در شکل 1 قابل مشاهده است، تغییرات SMP $_{f(SFA)}$، رفتاری صعودی و S شکل (سیگموئیدی) دارد. هر سه این مدل‌ها برازش خوبی را با داده‌های تجربی در ناحیهٔ خطی منحنی SMP $_{f(SFA)}$ مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین از خود نشان دادند (شکل 1). با این وجود، به دلیل سیگموئیدی بودن منحنی SMP $_{f(SFA)}$، در قسمت‌های ابتدا و انتهای منحنی، مدل‌های خطی و درجه 2 انحراف بیشتری از داده‌های تجربی پیدا کردند (شکل 1). در مقادیر اسیدهای چرب اشباع بالاتر از محدودهٔ داده‌های تجربی، مدل خطی نقطه ذوبی حتی بیشتر از 72°C (نقطه ذوب تری استئارین) را پیش‌بینی کرد و مدل درجه 2 با توجه به سهمی شکل بودن، پس از رسیدن به نقطه ماکزیمم، کاهش در نقطه ذوب را ارائه داد که در عمل چنین پدیده‌ای کاملاً از واقعیت دور است. اما در عوض تابع سیگموئیدی گمپرتز با توجه به این که S شکل است، توانست با قابلیت بالاتری SMP را پیش‌بینی کند (شکل 1). از سوی دیگر با توجه به شاخص‌های نیکوئی برازش بهتر مدل گمپرتز (ضریب تعیین 0/99 و میانگین خطای مطلق 0/21°C) نسبت به مدل سیگموئید و سایر مدل‌های یگانه (جدول 3)، می‌توان نتیجه گرفت، تابع گمپرتز بهترین گزینه در جهت ساخت مدل‌های یگانه SMP $_{f(SFA)}$ است. توابع سیگموئیدی دارای کاربردهای گسترده در حوزه‌های مختلف می‌باشند. این توابع دارای دو مجانب افقی در مقادیر بالا و پایین منحنی خود و یک نقطه عطف در مقادیر میانی می‌باشند. در بین توابع مختلف سیگموئیدی، تابع گمپرتز پرکاربردترین آن‌ها در مدل‌سازی‌های ریاضی نظیر مدل‌سازی‌های سری‌های زمان می‌باشد و تاکنون کاربردهای متنوعی از آن در حوزه‌های مختلف عنوان شده است (24، 7).



شکل 1. برازش منحنی SMP $_{f(SFA)}$ مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین با توابع خطی، درجه 2 و سیگموئیدی (گمپرتز)

اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی: در راستای بررسی کفایت یک مدل ریاضی باید قابلیت آن در پیش‌بینی یک سری دیگر از داده‌های آزمایشگاهی که در ساخت مدل از آن‌ها استفاده نشده نیز، مورد ارزیابی قرار گیرد. در این صورت می‌توان با قاطعیت بالاتری در مورد کارایی یک مدل ریاضی اطمینان حاصل کرد (25). به منظور اعتبارسنجی مدل‌های خطی چندگانه و مدل گمپرتز پیشنهادی، از معادلات 1، 2 و 6 و ضرایب ارائه شده مربوط به آن‌ها در جدول 3 جهت پیش-بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده مخلوط‌های دوتایی روغن تخم پنبه: پالم استئارین (11)، روغن سویا: پالم اولئین کاملاً هیدروژنه (10)، روغن کانولا: سویای کاملاً هیدروژنه، روغن کانولا: پالم اولئین (4) و مخلوط سه تایی روغن آفتابگردان: روغن کانولا: سویای کاملاً هیدروژنه (2) به‌عنوان تابعی از ترکیب اسیدهای چرب‌شان استفاده و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و نیکوئی برازش بین آن‌ها ارزیابی شد (جدول 4). بر اساس جدول 4، مدل خطی چندگانه پیشنهادی به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب پالتمیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک توانایی بسیار ضعیفی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده مورد ارزیابی دارد. به نظر می‌رسد که هر چند مدل خطی چندگانه به صورت تابعی از اسیدهای چرب پالتمیک،

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک (معادله 1)، دارای بهترین شاخص‌های نیکوئی برازش بین تمامی مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های روغن سویا: پالم استئارین است (جدول 3)، اما این مدل در پیش‌بینی SMP سایر مخلوط‌های اینتراستریفیه شده ضعیف می‌باشد. چرا که در مورد این تابع، اگر ترکیب اسیدهای چرب خارج از محدودهٔ مورد استفاده در مدل‌سازی تحقیق حاضر (ترکیب اسیدهای چرب مخلوط‌های روغن سویا: پالم استئارین) باشد، SMP با مقادیری منفی و یا حتی فراتر از حداکثر مقدار نقطه ذوب موجود برای چربی‌ها (تری استئارین با 72°C) پیش‌بینی می‌کند که کاملاً دور از واقعیت است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مدل خطی چندگانه به صورت تابعی از اسیدهای چرب پالتمیک، استئاریک، اولئیک، لینولئیک و لینولنیک (معادله 1) تنها برای مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین و با همین محدوده مقداری از اسیدهای چرب مناسب است و کفایت لازم به‌عنوان یک مدل جامع در پیش‌بینی SMP چربی‌های اینتراستریفیه شده را ندارد. در عوض مدل خطی چندگانه به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و غیراشباع کل و مدل یگانه گمپرتز $SMP_{f(SFA)}$ با توجه به شاخص‌های نیکوئی برازش مناسب‌شان (به ترتیب با میانگین خطای مطلق کمتر از 4/03 و 4/16 °C)، قدرت بالایی در پیش‌بینی SMP هم مخلوط‌های دوتایی و هم مخلوط‌های سه‌تایی اینتراستریفیه شده مختلف را دارند (جدول 4).

جدول 4. مقایسهٔ نقطه ذوب لغزشی تجربی و پیش‌بینی شدهٔ انواع چربی‌های اینتراستریفیه شده به کمک مدل‌های پیشنهادی

نوع چربی‌های اینتراستریفیه شده	مدل خطی چندگانه تابعی از P، S، O، L و Ln (معادله 1)			مدل خطی چند گانه تابعی از SFA و UFA (معادله 2)			مدل گمپرتز ($SMP_{f(SFA)}$) (معادله 6)		
	SMP (°C)	نیکوئی برازش		SMP (°C)	نیکوئی برازش		SMP (°C)	نیکوئی برازش	
	تجربی	پیش‌بینی	MAE	r	پیش‌بینی	MAE	r	پیش‌بینی	MAE	r
PS:CSO			244/80	0/95		1/78	0/94		2/46	0/95
30:70	29/9	-309/1			34/7			35		
40:60	36/8	-260/5			37/1			37/5		
50:50	37/1	-203/8			40/0			40/6		
60:40	41/5	-161/3			40/7			42/5		
70:30	43/2	-100/8			43/3			45		
FHPO:SBO			203/90	0/97		2/73	0/97		2/87	0/97
15:85	24/6	-16/9			29/4			29/5		
25:75	31/2	62/2			34/2			34/5		
35:65	38	182/6			39/1			39/6		
45:55	45/7	282/4			43/9			44/5		
55:45	47	382/2			48/7			49/2		
65:35	49/6	482/0			53/6			53/7		
FHSBO:CO			480/0	-0/3		3/32	0/40		2/22	0/99
15:85	23	460/0			24/9			24/9		
20:80	25/6	591/5			27/7			27/7		
25:75	31	546/2			30/5			30		
30:70	35/5	500/8			26/7			33/4		
40:60	44	456/8			38/8			39/3		
PO:CO			109/0	-0/95		4/03	0/95		4/16	0/96
42:58	24/1	182/0			27/0			27		
55:45	25/2	137/2			30/1			30/2		
70:30	29/7	89/3			33/8			34/1		
FHSBO:CO:SFO			154/8	0/99		3/54	0/99		3/41	0/99
15:25:50	25/3	-55/2			25/9			25/9		
20:25:55	30/8	29/0			29/3			28/7		
25:25:50	34/1	123/4			31/2			31/4		
30:25:45	38/5	210/2			34/0			38/5		
35:25:40	43/1	291/8			36/8			43/1		
40:25:35	45/1	381/7			39/4			35/1		

P، پالمتیک اسید؛ S، استئاریک اسید؛ L، لینولئیک اسید؛ Ln، لینولنیک اسید؛ SFA، اسیدهای چرب اشباع (مجموع 14:0، 16:0 و 18:0)؛ UFA، اسیدهای چرب غیراشباع (مجموع 18:1، 18:2 و 18:3)؛ r، ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده؛ MAE، میانگین خطای مطلق؛ SMP، نقطه ذوب

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

لغزشی؛ PS، پالم استئارین؛ CSO، روغن تخم پنبه؛ FHPO، پالم اولئین کاملاً هیدروژنه؛ SBO، روغن سویا؛ FHSBO، سویای کاملاً هیدروژنه؛ CO، روغن کانولا؛ PO، پالم اولئین؛ SFO، روغن آفتابگردان.

توانایی هر دو این مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌هایی که حاوی حداقل یک فاز سخت (مخلوط‌های حاوی پالم استئارین، پالم اوائین کاملاً هیدروژنه و سویای کاملاً هیدروژنه) بودند نسبت به مخلوطی که فاقد فاز سخت است (مخلوط حاوی پالم اولئین) کمی بالاتر است. این موضوع می‌تواند به دلیل اختلاف در ترکیب اسیدهای چرب به ویژه ترکیب اسیدهای چرب اشباع این مخلوط باشد. نتایج اعتبارسنجی این دو مدل با نتایج مربوط به مدل گمپرتز پیشنهادی ابراهیمی (10) نزدیک بود، با این تفاوت که مدل‌های جامع پیشنهادی حاضر SMP مخلوط‌های حاوی فاز سخت را با خطای کمتری نسبت به مدل پیشنهادی وی پیش‌بینی می‌کنند.

بررسی ضرایب همبستگی پیرسون، مؤید این مسئله است که SMP چربی‌های اینتراستریفیه شده کاملاً از ترکیب اسیدهای چرب‌شان تأثیر می‌پذیرد و توانایی استفاده به‌عنوان متغیر مستقل در جهت پیش‌بینی SMP را دارند. تمامی مدل‌های پیشنهادی، توانایی بسیار بالایی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین داشتند. در بین مدل‌های یگانه، مدل گمپرتز علاوه بر این که دارای بهترین شاخص‌های نیکوئی برازش بود، با توجه به سیگموئیدی (S شکل) بودن به بهترین نحو با منحنی SMP $_{f(SFA)}$ مخلوط‌های اینتراستریفیه شده روغن سویا: پالم استئارین قابل برازش بود و بهترین گزینه جهت انتخاب به‌عنوان مدل یگانه است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد، مدل خطی چندگانه به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و غیراشباع کل و مدل یگانه گمپرتز SMP $_{f(SFA)}$ قدرت بالایی در پیش‌بینی SMP مخلوط‌های اینتراستریفیه شده مختلف را دارند. در مجموع می‌توان گفت از بین مدل‌های مختلف مورد بررسی، مدل خطی چندگانه به‌عنوان تابعی از اسیدهای چرب اشباع کل و غیراشباع کل (معادله 2) و مدل گمپرتز پیشنهادی را می‌توان به عنوان یک مدل جامع مناسب جهت پیش‌بینی SMP چربی‌های گوناگون اینتراستریفیه شده به حساب آورد.

سپاسگزاری: از شرکت روغن نباتی پارس قو (تهران، ایران) جهت کمک‌های تکنیکی و شرکت روغن نباتی نوش آذر (تهران، ایران) به دلیل اهدای مواد خام کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

• References

1. Khatoon S, Reddy SRY. Plastic fats with zero trans fatty acids by interesterification of mango, mahua and palm oils. Eur J Lipid Sci Tech 2005; 107(11): 786-91.

2. Farmani J, Hamedi M, Safari M, Madadlou A. Trans-free Iranian vanaspati through enzymatic and chemical transesterification of triple blends of fully hydrogenated soybean, rapeseed and sunflower oils. Food Chem 2007; 102(3): 827-33.

3. Farmani J, Hamedi M, Safari M. Production of zero trans Iranian vanaspati using chemical transesterification and blending techniques from palm olein, rapeseed and sunflower oils. Int J Food Sci Tech 2008; 43(3): 393-9.

4. Farmani J, Safari M, Hamedi M. Trans-free fats through interesterification of canola oil/palm olein or fully hydrogenated soybean oil blends. Eur J Lipid Sci Tech 2009; 111(12): 1212-20.

5. Fauzi SHM, Rashid NA, Omar Z. Effects of chemical interesterification on the physicochemical, microstructural and thermal properties of palm stearin, palm kernel oil and soybean oil blends. Food Chem 2013; 137: 8-17.

6. Ahmadi L, Marangoni AG. Functionality and physical properties of interesterified high oleic shortening structured with stearic acid. Food Chem 2009; 117(4): 668-73.

7. Farmani J. Modeling of solid fat content of chemically interesterified fully hydrogenated soybean oil and canola oil blends as a function of temperature and saturated fatty acids. Food Measure 2015; 9(3): 281–289.

8. Belitz HD, Grosch W, Schieberle P. Food Chemistry, 4th Ed. Berlin: Springer; 2009.

9. O'Brien RD Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications, 3th Ed. New York: CRC Press; 2004.

10. Ebrahimi l. Modeling of solid fat content and melting point of enzymatically interesterified fats. Sari: Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Faculty of Agricultural Engineering; 2014 [in Persian].

11. Karabulut I, Turan S, Ergin G. Effects of chemical interesterification on solid fat content and slip melting point of fat/oil blends. Eur Food Res Technol 2004; 218(3): 224-9.

12. Boyaci IH, Karabulut I, Turan S. Slip melting point estimation of fat blends before and after interesterification based on their fatty acid compositions. J Food Lipids 2003; 10(3): 193-202.

13. Ribeiro APB, Grimaldi R, Gioielli LA, Gonçalves LAG. Zero trans fats from soybean oil and fully hydrogenated

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

soybean oil: Physico-chemical properties and food applications. Food Res Int 2009; 42(3): 401-10.

14. Fasina OO, Craig-Schmidt M, Colley Z, Hallman H. Predicting melting characteristics of vegetable oils from fatty acid composition. Food Sci Technol-LWT 2008; 41**:** 1501-1505.

15. AOCS. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. 4th ed ed: Champaign: AOCS Press.; 1996.

16. Andreia Schäfer De Martini Soares F, Claro da Silva R, Caroline Guimarães da Silva K, Bertolessi Lourenço M, Ferreira Soares D, Antonio Gioielli L. Effects of chemical interesterification on physicochemical properties of blends of palm stearin and palm olein. Food Res Int. 2009; 42(9): 1287-94.

17. Balan, B., S. Mohaghegh, and S. Ameri. State- of- Art- in permeability determination from well log data: Part 1- A comparative study, Model development. Soc Petrol Eng J. 1995; 30978: 17-25.

18. Davenel A, Riaublanc A, Marchal P, Gandemer G. Quality of pig adipose tissue: relationship between solid fat content and lipid composition. Meat Sci. 1999; 51(1): 73-9.

19. Ospina-E JC, Cruz-S A, Pérez-Álvarez JA, Fernández-López J. Development of combinations of chemically modified vegetable oils as pork backfat substitutes in sausages formulation. Meat Sci. 2010; 84(3): 491-7.

20. Costales-Rodríguez R, Gibon V, Verhé R, De Greyt W. Chemical and Enzymatic Interesterification of a Blend of Palm Stearin: Soybean Oil for Low trans-Margarine Formulation. J Am Oil Chem Soc. 2009; 86(7): 681-97.

21. Soares FASDM, da Silva RC, Hazzan M, Capacla IR, Viccola ER, Maruyama JM, et al. Chemical Interesterification of Blends of Palm Stearin, Coconut Oil, and Canola Oil: Physicochemical Properties. J Agric Food Chem. 2012; 60(6): 1461-9.

22. Criado M, Hernández-Martín E, López-Hernández A, Otero C. Enzymatic Interesterification of Extra Virgin Olive Oil with a Fully Hydrogenated Fat: Characterization of the Reaction and Its Products. J Am Oil Chem Soc. 2007; 84: 717-726.

23. Masuchi M, Gandra K, Maranconi A, DE Sá Perwrenha C, Chiu M, Grimaldi R, Goncalves L. Fats from Chemically Interesterified High-Oleic Sunflower Oil and Fully Hydrogenated Palm Oil. J Am Oil Chem Soc. 2014; 91: 859-866.

24. Augusto PED, Soares BMC, Chiu MC, Gonçalves LAG. Modelling the effect of temperature on the lipid solid fat content (SFC). Food Res Int. 2012; 45(1): 132-5.

25. Mortazavi A, Ziaalhagh H. Modeling of food process. Mashhad: Ferdowsi University of mashhad. Press; 2007. P. 5-24. [in Persian].

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]

Modeling the Slip Melting Point of Chemically Interesterified Fats as a Function of Fatty Acid Composition

Naeli MH[1], Farmani J[1], Zargaraan A[2]*

1- MSc Student of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

*2- *Corresponding author: Assistant prof, Dept. of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.*

3- Assistant prof, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Received 15 Aug, 2015 **Accepted 2 Nov, 2015**

Background and Objectives: Slip melting point (SMP) is one of the most important qualitative and functional properties of fats. However, the common melting point determination methods are generally time-consuming. Therefore, in this research, regression models were developed for description of the SMP of interesterified fats as a function of fatty acid composition.

Materials and Methods: Blends of soybean oil and palm stearin were subjected to chemical interesterification, and the fatty acid composition and SMP of the products were determined. SMP of the interesterified fats was modeled as a function of fatty acid composition using regression analysis. Goodness of fit of different models was evaluated, and finally, the best model for SMP prediction was determined.

Results: The SMP of blends decreased after interesterification significantly ($p<0.05$). A good Pearson's correlation coefficient ($r > 0.99$) was observed between SMP and all fatty acids ($p < 0.01$). Accordingly, the following strategies were used for SMP modeling: as a multiple function of palmitic, stearic, oleic, linoleic and linolenic acids; as a multiple function of total saturated and unsaturated fatty acids; as a function of saturated fatty acids. The proposed models for prediction of the SMP of interesterified soybean oil and palm stearin blends showed a correlation coefficient (between the experimental and predicted data) of greater than 0.99, and a mean absolute error lower than 0.52°C, indicating the high prediction power of the models.

Conclusions: The results of model validation showed that the model describes SMP as a multiple function of total saturated and unsaturated fatty acids and the Gompertz model describes SMP as a function of total saturated fatty acids could predict the SMP of different interesterified fats in the best way. The models may be useful in the design and development of new interesterified fat formulations.

Keywords: Chemical interesterification, Modeling, Slip melting point, Fatty acid composition

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-24]