Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Ruminant Research

Print ISSN: 2345 - 4261
Online ISSN: 2345 - 4253

Effects microencapsulation on physical and chemical characteristics, fatty acid profile, and oxidative stability of fish and sunflower oil compared with Ca- salts

Hamed Khalilvandi-Behroozyar[1*], Behzad Asadnezhad[2], Rasoul Pirmohammadi[3]

[1] Associate Professor, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: h.khalilvandi@urmia.ac.ir

[2] Post-Doctoral Researcher, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

[3] Professor, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 07/02/2023
Revised: 12/25/2023
Accepted: 01/29/2024

Keywords:
Microcapsules
Oil release
Peroxide
Poly unsaturated fatty acid
Spray dryer Stability

ABSTRACT

Background and Objectives: The extremely high sensitivity of unsaturated fatty acids to oxidation and the problems related to their storage and consumption in liquid form are among the most important obstacles to the use of these resources in feeding farm animals, along with problems such as extensive biohydrogenation and adverse effects on the normal functioning of the rumen ruminants. In addition, the decrease in the amount of feed consumed and the decrease in the acceptability of carcasses and products due to the unpleasant smell are other reasons for the reluctance of livestock breeding units to use fish oil. So the aim of this study was to determination of spray dry microencapsulation effects on fatty acid profile and nutrient content, physical and chemical characteristics and oxidative stability of fish and sunflower oil, compared with ca-salts *in vitro*.

Materials and Methods: In this research, a completely randomized design was used in the statistical analysis of the data related to the chemical composition, physical properties, and oxidation parameters after the production of the fatty acid sample in order to statistically analyze the data related to the oxidation resistance of various types of encapsulated supplements. In time, temperature and different levels of minerals, a factorial design based on a completely random design was used. Microcapsules produced with different oil sources (free fatty acids vs. triacylglycerol of fish and sunflower oil), different wall material systems (Physical blend of carbohydrate and protein sources vs. Maillard reaction products of them) and different ratio of core oil to wall materials. The conditions for preparation of emulsions and stages of drying and storage of produced microcapsules were based on the method provided by researchers with the same coating materials and fish and sunflower oil as oil sources. Fish and sunflower oil were added to the initial mixture with ratios of 1:2, 1:1 and 2:1 (coating materials to oil). In addition to glycerol oils, oil-in-water emulsions were also prepared from fish and sunflower fatty acids. To dry the emulsions, a spray dryer was used with an inlet air temperature of 130°C and an outlet temperature of 60-70°C. Determining the amount of nutrients (fat, dry matter, organic matter, calcium, different parts of the cell wall, different carbohydrate and protein parts and fat extraction, making methyl ester and determining the pattern of fatty

acids) in the composition of microcapsules produced using standard procedures were performed. The particle size of the produced emulsions and powders was determined using the laser diffraction technique. Microcapsules and calcium salts of fish oil and sunflower were exposed to temperatures of 25 and 60 degrees for 15, 30 and 45 days, and every two weeks one sample of each supplement was analyzed in order to evaluate the amount of peroxide value. For each supplement, 3 replicates were evaluated at each time and temperature.

Results: Emulsions made from triacylglycerol's have higher stability over time compared with FFA sources and were used for spray drying and further analysis. Different oil sources (fish oil vs sunflower oil) have no effects on microencapsulation efficiency, microencapsulation yield. However, wall material system has its effects. Maillard reaction products had higher encapsulation efficiency than physical blends and resulting microcapsules had higher microencapsulation efficiency, lower oxidative state parameters and more preserved fatty acid profile. Encapsulation with Maillard reaction products resulted in more oxidative stability in different storage conditions (different time and temperatures, with or without mineral stimulated oxidation), but the core oil type and ratio to wall materials affect the results. Sunflower oil gives the more oxidative stability than the fish oil, but higher the oil content of microcapsules, higher the oxidation. Oil content also significantly affects fatty acid profile of microcapsules. Results showed that fatty acid Ca- salts had highest oxidative protection between protection strategies.

Conclusion: Although microencapsulation protected oils from oxidation, incomplete data about nutrient availability, nutritional value and gastrointestinal tract digestibility of microencapsulated oils compared with a large data set about Ca-salt, warrants further *in vivo* studies.

Cite this article: Khalilvandi-Behroozyar, H., Asadnezhad, B., Pirmohammadi, R. (2024). Effects microencapsulation on physical and chemical characteristics, fatty acid profile, and oxidative stability of fish and sunflower oil compared with Ca- salts. *Journal of Ruminant Research*, 12(2), 19-44.

© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejrr.2024.21522.1907

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پژوهش در نشخوارکنندگان
شاپا چاپی: ۴۲۶۱-۲۳۴۵
شاپا الکترونیکی: ۴۲۵۳-۲۳۴۵

اثر ریزپوشانی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، الگوی اسیدهای چرب و مقاومت اکسیداتیو روغن ماهی و روغن آفتابگردان در مقایسه با مکمل‌های کلسیمی

حامد خلیل‌وندی بهروزیار[1*]، بهزاد اسدنژاد[2] و رسول پیرمحمدی[3]

[1] دانشیار گروه علوم دامی دانشگاه ارومیه، رایانامه: h.khalilvandi@urmia.ac.ir
[2] محقق دوره پسا دکترا گروه علوم دامی دانشگاه ارومیه
[3] استاد گروه علوم دامی دانشگاه ارومیه

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۰/۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۹

واژه‌های کلیدی:
آزادسازی روغن
آنیسیدین
پراکسید
خشک‌کن پاششی
ریزکپسول

چکیده

سابقه و هدف: حساسیت فوق‌العاده بالای اسیدهای چرب غیراشباع به اُکسایش و مشکلات موجود در ارتباط با نگهداری و مصرف آن‌ها به شکل مایع از جمله مهم‌ترین موانع استفاده از این منابع در تغذیه حیوانات مزرعه‌ای در کنار مشکلاتی همانند بیوهیدروژناسیون گسترده و اثرات نامطلوب بر عملکرد طبیعی شکمبه نشخوارکنندگان است. افزون بر این، افت خوراک مصرفی و کاهش مقبولیت لاشه و محصولات تولیدی، از دیگر دلایل عدم تمایل واحدهای پرورش دام به استفاده از روغن ماهی است؛ بنابراین هدف از این پژوهش، تولید و ارزیابی مکمل‌های ریزپوشانی شده روغن ماهی و آفتابگردان با استفاده از خشک‌کنِ پاششی و ارزیابی میزان مواد مغذی و الگوی اسیدهای چرب، میزان پوشانندگی مواد مختلف و ارزیابی میزان مقاومت در برابر اکسیداسیون محیطی در مقایسه با نمک‌های کلسیمی در شرایط آزمایشگاهی بود.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق از طرح کاملاً تصادفی در تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های مربوط به ترکیب شیمیایی، خصوصیات فیزیکی و شاخصه‌های اکسایش پس از تولید و الگوی اسیدهای چرب استفاده شد به‌منظور آنالیز آماری داده‌های مربوط به مقاومت اکسیداسیونی انواع مکمل‌های کپسوله شده در زمان، دما و سطوح مختلف مواد معدنی از طرح فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. ریزکپسول‌ها با استفاده از نسبت‌های مختلف روغن به مواد پوشاننده و نیز با استفاده از ترکیبات پوشاننده مختلف تولید شدند. تهیه امولسیون‌ها و مراحل خشک‌کردن و نگهداری ریزکپسول‌های تولیدی بر اساس روش‌های استاندارد و با استفاده از مواد پوشاننده یکسان و روغن‌های ماهی و آفتابگردان انجام شد. روغن ماهی و آفتابگردان با نسبت‌های ۱:۲، ۱:۱ و ۲:۱ (مواد پوشاننده به روغن) به مخلوط اولیه افزوده شدند. امولسیون‌های روغن در آب، علاوه بر روغن‌های گلیسرولی از اسیدهای چرب ماهی و آفتابگردان نیز تهیه شدند. جهت خشک‌کردن امولسیون‌ها از دستگاه خشک‌کن پاششی با دمای هوای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و دمای خروجی ۷۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد.

تعیین میزان ترکیب مواد مغذی (چربی خام، ماده خشک، ماده آلی، کلسیم، بخش‌های مختلف دیواره سلولی، بخش‌های مختلف کربوهیدراتی و پروتئینی و استخراج چربی، ساخت استر متیلی و تعیین الگوی اسیدهای چرب) در ترکیب ریزکپسول‌های تولیدی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی استاندارد انجام شد. اندازه ذرات امولسیون‌ها و پودرهای تولیدی با استفاده از روش افتراق لیزری تعیین شد. ریزکپسول‌ها و نمک‌های کلسیمی روغن‌ماهی و آفتابگردان به‌مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روز در معرض دمای ۲۵ و ۶۰ درجه قرارگرفته و هر دو هفته یک‌نمونه از هرکدام از مکمل‌ها بمنظور ارزیابی میزان عدد پراکسید، مورد آنالیز قرار گرفت. به ازای هر مکمل ۳ تکرار در هر زمان و دما مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج: امولسیون‌های تولیدشده با استفاده از ترکیبات روغنی، دارای پایداری بالاتری نسبت به امولسیون‌های تولیدی با استفاده از اسیدهای چرب آزاد بودند (P<۰/۰۵). تفاوت معنی‌داری بین انواع روغن‌ها در خصوصیات کلی ریزکپسول‌های تولیدی از نظر عملکرد کپسوله شدن یا میزان تولید ریزکپسول‌ها وجود نداشت. مواد پوشاننده فرآوری شده به‌صورت محصولات واکنش میلارد، سطوح بالاتری از روغن را می‌توانند پوشش‌دار کنند که ریز کپسول‌های تولیدشده عملکرد بالایی در ریزپوشانی و شاخصه‌های اُکسایش بلافاصله پس از تولید و حفظ الگوی اسیدهای چرب در مقایسه با روغن‌های فرآوری نشده داشتند (P<۰/۰۵). کم‌ترین میزان اکسیداسیون در شرایط نگهداری با و بدون ترکیب با مخلوط مکمل مواد معدنی، متعلق به ریزکپسول‌های حاصل از محصولات واکنش میلارد بود (P<۰/۰۵). با این‌حال نوع و میزان روغن موجود در ترکیب ریزکپسول‌ها، میزان شاخصه‌های مختلف اکسیداسیون و الگوی اسیدهای چرب را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرارداد (P<۰/۰۵).

نتیجه‌گیری: نمک‌های کلسیمیِ اسیدهای چرب دارای بیشترین عملکرد در حفظ خصوصیات اکسیداتیو و الگوی اسیدهای چرب بودند. با وجود محافظت مناسب اسیدهای چرب غیراشباع در برابر اکسیداسیون اولیه و ثانویه، اطلاعات چندانی در خصوص ارزش تغذیه‌ای و گوارش-پذیری مکمل‌های ریزپوشانی شده در مقایسه با نمک‌های کلسیمی وجود نداشته و این امر، بیانگر لزوم انجام مطالعات بیشتر به‌خصوص مطالعات درون‌تنی در این ارتباط است.

استناد: خلیل‌وندی بهروزیار، حامد؛ اسدنژاد، بهزاد؛ پیرمحمدی، رسول. (۱۴۰۳). اثر ریزپوشانی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، الگوی اسیدهای چرب و مقاومت اکسیداتیو روغن ماهی و روغن آفتابگردان در مقایسه با مکمل‌های کلسیمی. *پژوهش در نشخوارکنندگان*، ۱۲(۲)، ۴۴-۱۹.

DOI: 10.22069/ejrr.2024.21522.1907

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

اهمیت استفاده از چربی‌ها از گذشته به‌عنوان منبع تأمین انرژی، ویتامین‌های محلول در چربی و برخی اسیدهای چرب ضروری در تغذیه دام و طیور شناخته‌شده است. مطالعات زیادی اهمیت فیزیولوژیکی اسیدهای چرب غیراشباع ضروری در فرآیندهای مختلف متابولیسمی، ایمنی، عملکرد تولیدی و تولیدمثلی در گونه‌های مختلف حیوانات مزرعه‌ای را مورد اشاره قرار داده و زمینه را برای استفاده هدفمند از اسیدهای چرب مختلف صرف‌نظر از تأمین انرژی پدید آورده است (Reynolds و همکاران، ۲۰۰۳؛ Santos و همکاران، ۲۰۰۸). در این میان توجه ویژه‌ای به روغن ماهی (ایکوزاپنتانوئیک‌اسید و دکوزاهگزانوئیک‌اسید) و منابع اسید لینولئیک در جیره‌های غذایی حیوانات مزرعه‌ای پرتولید، به‌منظور بهبود عملکرد تولیدمثلی و متابولیسمی (Mashek و همکاران، ۲۰۰۵) و تغییر الگوی اسیدهای چرب در محصولات تولیدی به‌منظور کاهش مصرف اسیدهای چربِ مضر توسط انسان و کاهش خطر بیماری‌های قلبی و عروقی شده است (Kris-Etherton و همکاران، ۲۰۰۲). حساسیت فوق‌العاده بالای اسیدهای چرب غیراشباع به اُکسایش و مشکلات موجود در ارتباط با نگهداری و مصرف آن‌ها به شکل مایع از جمله مهم‌ترین موانع استفاده از این منابع در تغذیه حیوانات مزرعه‌ای تک‌معده‌ای، در کنار مشکلاتی همانند بیوهیدروژناسیون گسترده و اثرات نامطلوب بر عملکرد طبیعی شکمبه نشخوارکنندگان است (Chilliard و همکاران، ۲۰۰۷). افزون بر این، افت میزان خوراک مصرفی و کاهش مقبولیت لاشه و محصولات تولیدی به دلیل بوی نامطبوع، از دیگر دلایل عدم تمایل واحدهای پرورشِ دام به استفاده از روغن ماهی است. مطالعات زیادی در زمینهٔ اثر ریزپوشانی منابع مختلف روغنی بخصوص روغن ماهی بر افزایش ماندگاری و کاهش فساد اکسیداتیو در زمینه تغذیه انسانی وجود دارد. (Bakry و همکاران، ۲۰۱۶؛ Binsi و همکاران، ۲۰۱۷). با این‌حال، مطالعات چندانی در زمینه کاربرد روش‌های مختلف پوشش‌دار کردن بر قابلیت استفاده از منابع روغنی در صنعت دام‌پروری وجود ندارد. عملکرد محافظتی فرآیند ریزپوشانی به عوامل مختلفی از جمله نوع و کیفیت روغن مورداستفاده، نوع روش و مواد پوشاننده مورداستفاده و شرایط محیطی نگهداری بستگی دارد. در تحقیقی، Safari و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه میزان آزادسازی روغن از ریزکپسول‌های پروتئین آب پنیر و اسیدتانیک در شرایط اسیدیته شبیه‌سازی‌شده شکمبه و شیردان پرداختند ولی هیچ داده‌ای در ارتباط با عملکرد محافظت در برابر بیوهیدروژناسیون و یا آزادسازی در شرایط فعالیت آنزیمی در دستگاه گوارش گزارش نکردند. در مطالعهٔ دیگری،Khalilvandi و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی میزان محافظت اسیدهای چرب روغن ماهی کپسوله شده با استفاده از نسبت‌های مختلف روغن ماهی و مواد پوشاننده مختلف در برابر بیوهیدروژناسیون شکمبه‌ای و برخی شاخصه‌های ارزش غذایی مکمل‌های ریزپوشانی شده روغن ماهی در تغذیه نشخوارکنندگان پرداختند. در آن مطالعه کمترین میزان بیوهیدروژناسیون در بین منابع محافظت‌شده مربوط به ریزکپسول‌های حاصل از محصولات واکنش میلاد و بیشترین میزان مربوط به ریزکپسول‌های غیر میلاد بوده و نمک‌های کلسیمی حالت بینابینی از خود نشان دادند؛ بنابراین هدف اصلی این تحقیق، تولید ریزکپسول‌های روغن‌ماهی و آفتابگردان به ترتیب به عنوان منابع اسیدهای چرب امگا-۳ و امگا-۶، با روش خشک‌کن پاششی و استفاده از سطوح مختلف روغن، مواد پوشاننده فرآوری شده و نشده، ارزیابی مواد مغذی موجود در

ترکیب ریزکپسول‌های تولیدی و بررسی تأثیر ریزپوشانی بر محافظت اکسیداتیو اسیدهای چرب غیراشباع در مقایسه با نمک‌های کلسیمی اسیدهای چرب بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت مشترک در گروه علوم دامی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، گروه علوم دامی دانشگاه ارومیه و پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران انجام شد. با توجه به حساسیت متفاوت اسیدهای چرب آزاد و روغن‌ها به اکسیداسیون، از روغن (در مقایسه با روغن موجود در ریزکپسول‌ها) و اسیدهای چرب آزاد (در مقایسه با اسیدهای چرب موجود در ساختار نمک‌های کلسیمی)، به‌عنوان شاهد استفاده شد. اسیدهای چرب آزاد با استفاده از روش Ganga و همکاران (۱۹۹۸) از روغن استحصال شد.

تولید و ارزیابی مکمل‌های چربی: شرایط تهیه امولسیون‌ها و مراحل خشک‌کردن و نگهداری ریزکپسول‌های تولیدی بر اساس روش ارائه‌شده توسط Khalilvandi و همکاران (۲۰۱۳) با مواد پوشاننده یکسان و روغن‌های ماهی و آفتابگردان به‌عنوان منابع روغن بود. روغن ماهی و آفتابگردان با نسبت‌های ۱:۲، ۱:۱ و ۲:۱ (مواد پوشاننده به روغن) به مخلوط اولیه افزوده شدند. امولسیون‌های روغن در آب، علاوه بر روغن‌های گلیسرولی از اسیدهای چرب ماهی و آفتابگردان نیز تهیه شدند. جهت خشک‌کردن امولسیون‌ها از دستگاه خشک‌کن پاششی (مینی اسپری درایر، مدل ۲۷۰) با دمای هوای ورودی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و دمای خروجی ۷۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. امولسیون‌ها در طول زمان خشک شدن مرتباً به هم زده می‌شدند. محصولات جمع شده در محفظه نگهداری محصول، توزین و تحت گاز آرگون بسته‌بندی‌شده و تا آزمایش‌های بعدی در دمای ۲۰- درجه نگهداری شدند. نمک‌های کلسیمی (پرشیافت ماهی® و پرشیافت امگا-۶®) توسط شرکت کیمیا دانش الوند در اتمسفر خنثی با گاز آرگون تولید شدند.

برای تعیین چربی کل مکمل‌های تولیدی از روش AOAC 954.02 (2000)(هضم اسیدی و استخراج با حلال) استفاده شد. برای محاسبهٔ میزان ماده خشک محصولات تولیدی از آون با دمای ۱۰۵ درجهٔ سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت (AOAC 930.15 2000) استفاده شد و میزان خاکستر با قرار دادن نمونه‌ها در کوره با دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت تعیین شد (AOAC ID #942.05 2000). میزان کلسیم موجود در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی Atomic absorption, flame emission spectrophotometer, AA-670, Shimadzu تعیین شد. متیل استر اسیدهای چرب بر اساس روش ایکیهارا و فوکوبایاشی ۲۰۱۰ و با استفاده از اسیدکلریدریک متانولی ساخته و از نونادکانوئیکاسید به‌عنوان استاندارد داخلی استفاده شد. تعیین الگوی اسیدهای چرب با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی(واریان، مدل ۳۸۰۰) مجهز به شناساگر شعله یونی و ستون مویین با مشخصات، طول ۱۰۰ متر، قطر خارجی ۰/۲ میکرومتر انجام شد. اسیدهای چرب با توجه به قله اسید چرب متناظر در مخلوط استاندارد تزریق‌شده در شرایط مشابه با نمونه-ها شناسایی‌شده و از نیتروژن به‌عنوان گاز حامل استفاده شد. دمای محل تزریق و شناساگر ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار تزریق ۱ میکرولیتر و نسبت تقسیم (ورود به ستون) برابر با ۱:۵۰ و برنامه دمایی ستون بر اساس Lee و همکاران (۲۰۰۵) انتخاب شد. از مقایسه سطح زیر منحنی متیل استر اسیدهای چرب با سطح زیر منحنی استاندارد داخلی و غلظت اسیدهای چرب

در مخلوط استاندارد به‌منظور محاسبه غلظت متیل استر اسیدهای چرب مختلف استفاده شد (Lee و همکاران، ۲۰۰۵) از تغییرات مقدار هر کدام از اسیدهای چرب غیراشباع در هر زمان نسبت به زمان صفر جهت محاسبه میزان بیوهیدروژناسیون ظاهری استفاده و مقادیر اسیدهای چرب در هر زمان نسبت به بلانک تصحیح شد (Fievez و همکاران، ۲۰۰۷).

پ) ارزیابی میزان آزادسازی روغن در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده: تعیین میزان انواع مواد مغذی (چربی خام، ماده خشک، ماده آلی، کلسیم، بخش‌های مختلف دیواره سلولی، بخش‌های مختلف کربوهیدراتی و پروتئینی و استخراج چربی، ساخت استر متیلی و تعیین الگوی اسیدهای چرب) در ترکیب ریزکپسول‌های تولیدی با استفاده از روش‌های استاندارد مطابق روند شرح داده‌شده قبلی انجام شد (Khalilvandi و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۰۱۵).

عملکرد کپسوله‌شدن و اندازه ذرات امولسیون و پودرها: اندازه ذرات امولسیون‌ها و پودرهای تولیدی با استفاده از تکنیک افتراق لیزری (Malvern Mastersizer) به ترتیب بر اساس روش Hogan و همکاران (۲۰۰۱) و Kim و همکاران (۱۹۹۶) تعیین شد. برای اندازه‌گیری روغن موجود در سطح ریزکپسول از روش Pisecky (۱۹۹۷) و پترولیوم اتر استفاده شد. عملکرد کپسوله شدن از تفاضل روغن سطحی از روغن کل، محاسبه‌شده و به‌صورت ضریب وزنی روغن کل گزارش شد (معادله شماره ۱).

معادله ۱:

$$E = \frac{\left[\text{Total oil content}\left(\frac{g}{100g}\text{powder}\right) - \text{Free oil content}\left(\frac{g}{100g}\text{powder}\right) \times 100\right]}{\text{Total oil content (g/100g powder)}}$$

مقاومت در برابر اُکسایش: ریزکپسول‌ها و نمک‌های کلسیمی روغن‌ماهی و آفتابگردان به مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روز در معرض دمای ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرارگرفته و هر دو هفته یک نمونه از هرکدام از مکمل‌ها به‌منظور ارزیابی میزان عدد پراکسید مورد آنالیز قرار گرفت. به ازای هر مکمل ۳ تکرار در هر زمان و دما مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی اثر مجاورت با مواد معدنی و شبیه‌سازی شرایط واقعی مزرعه‌ای بر فرایند اُکسایش، این آزمایش با مخلوط ۱:۱ وزنی مکمل تجاری مواد معدنی و مکمل‌های چربی تولیدی نیز تکرار شد. مکمل مورداستفاده دارای کلسیم (۱۲درصد)، فسفر (۲ درصد)، منیزیم (۲ درصد)، سدیم (۱۸ درصد)، گوگرد (۰/۳ درصد)، آهن (۱۴۰۰ mg/kg)، منگنز (۲۰۰۰ mg/kg)، روی (۷۰۰۰ mg/kg)، کبالت (۱۴ mg/kg) و مس (۱۲۰۰ mg/kg) بود. روش‌های استاندارد AOCS (۲۰۰۴) به‌منظور اندازه‌گیری شاخصه‌های مختلف اُکسایش شامل عدد پراکسید (AOCS official Method Cd-8b-90)، عدد تیوباربیتوریک اسید (AOCS official Method Cd-19-90) و عدد آنیسیدین (AOCS official Method Cd-18-90) برای اندازه‌گیری شاخصه‌های اکسیداسیون مورداستفاده قرار گرفت. به‌منظور محافظت از اُکسایش در حین آماده‌سازی نمونه، کلیه مراحل استخراج روغن‌ها تحت گاز آرگون و با حداقل دمای ممکن صورت گرفت. از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-Visible Recording Spectrophotometer, UV-2100) مجهز به دستگاه مکش اتوماتیک (Sipper 260, Shimadzu) به‌منظور اندازه‌گیری جذب نوری نمونه‌ها استفاده شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها

از طرح کاملاً تصادفی در تجزیه وتحلیل آماری داده‌های مربوط به ترکیب شیمیایی، خصوصیات فیزیکی و شاخصه‌های اکسایش پس از تولید و الگوی اسیدهای چرب استفاده شد (معادله ۲). به‌منظور

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های مربوط به مقاومت اکسیداسیونی انواع مکمل‌های کپسوله شده در زمان، دما و سطوح مختلف مواد معدنی از طرح فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی استفاده شد (معادله ۳). نوع مکمل، زمان، دما و سطح مواد معدنی به‌عنوان عوامل اصلی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ابتدا کلیه‌ی روابط متقابل بین اثرات اصلی در مدل قرار گرفت و در صورت بالا بودن P-value (P ≥25) از معادله مدل حذف شد. اثرات متقابل نشان‌داده شده در معادله آماری، نشان‌دهنده اثرات متقابل باقی‌مانده در مدل است. داده‌ها به‌صورت میانگین حداقل مربعات و خطای استاندارد در جداول مربوطه گزارش‌شده و تصحیح داده‌ها با استفاده از آزمون توکی و مقایسه میانگین‌ها با گزینه PDIFF نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱، ۲۰۰۲) در سطح آماری ۰/۰۵ انجام شد. در این معادله Y = مقدار هر مشاهده؛ μ = میانگین کل؛ S= اثر نوع مکمل (Supplement Type)؛ T= اثر زمان نگهداری (Incubation Time)؛ TE = اثر دمای نگهداری (Incubation Temperature)؛ M= اثر مکمل مواد معدنی؛ ST = اثر متقابل نوع مکمل و زمان؛ STE = اثر متقابل نوع مکمل و دما؛ SM= اثر متقابل نوع مکمل و سطح مکمل مواد معدنی e_i= اثر اشتباه آزمایشی بود.

معادله ۲:

$$Yi = \mu + T_i + e_i$$

معادله ۳:

$$Y_{ijkl}= \mu + S_i + T_j + TE_k + M_l + ST_{ij} + STE_{ik} + SM_{il} + e_{ijkl}$$

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی، الگوی اسیدهای چرب، عملکرد تولید و ریزپوشانی و خصوصیات فیزیکی: میانگین ترکیب شیمیایی ریزکپسول‌های تولیدی در این آزمایش با استفاده از مواد پوشاننده مختلف در جدول ۲ آورده شده و جدول ۳ نشان‌دهندهٔ میانگین خصوصیات و عملکرد تولیدی ریزکپسول‌ها در سیستم‌های مختلف تولید است. با توجه به عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین منابع مختلف روغن در ترکیب شیمیایی ریزکپسول‌ها و به‌منظور اجتناب از بزرگ شدن جداول، تنها میانگین داده‌های مربوط به ریزکپسول‌های روغن‌های ماهی و آفتابگردان در هر نوع ماده پوشاننده و نسبت روغن به مواد پوشاننده در جداول ۲ و ۳ گزارش‌شده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های محصولات تولیدی با استفاده از روش کپسوله کردن، وجود سایر مواد مغذی همانند کربوهیدرات‌ها و مواد پروتئینی با کیفیت بالا در ترکیب مواد کپسوله شده است. تفاوت‌های مشاهده‌شده در ارتباط با میزان روغن در ترکیب پودرهای تولیدی انعکاسی از استفاده از مقادیر متفاوت روغن در ترکیب امولسیون‌ها است. با توجه به خصوصیات منابع کربوهیدراتی و پروتئینی مورداستفاده در ترکیب امولسیون‌ها، می‌توان ایجاد ترکیبات شبه دیواره سلولی در بخش‌های مختلف کربوهیدراتی و پروتئینی را در اثر واکنش میلارد و بخشی از آن را در اثر حرارت ایجادشده در حین مراحل خشک‌کردن دانست. امولسیون‌های تولیدشده با استفاده از ترکیبات روغنی دارای پایداری بالاتری نسبت به امولسیون‌های تولیدی با استفاده از اسیدهای چرب آزاد بودند (داده‌ها گزارش نشده‌اند). گزارشی در ارتباط با مقایسه پایداری امولسیون‌ها و یا ریزکپسول‌های تولیدی از اسیدهای چرب غیراستریفه و گلیسرولی وجود ندارد. با توجه به عدم استفاده از ترکیبات امولسیفایر در این آزمایش، خصوصیات امولسیفایری اسیدهای چرب در حالت گلیسرولی را می‌توان از دلایل بالقوه پایدارتر بودن امولسیون‌های حاصل از آن‌ها در مقایسه با امولسیون‌های اسیدهای چرب غیراستریفه دانست.

جدول ۱- ترکیب امولسیون‌های مورد استفاده در تولید انواع ریزکپسول‌ها

Table 1. Emulsion composition used in microencapsulation

ریزکپسول‌ها Microcapsules	آب (درصد) Water (%)	منبع پروتئینی (درصد) Protein Source (%)	منبع کربوهیدارتی Carbohydrate Source (%)	روغن (درصد) Oil (%)
1	70.0	6.3	13.7	10.0
2	70.0	5.0	10.0	15.0
3	70.0	3.4	6.6	20.0
4	70.0	6.3	13.7	10.0
5	70.0	5.0	10.0	15.0
6	70.0	3.4	6.6	20.0

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی ریزکپسول‌های تولید شده (درصد)

Table 2- Chemical composition produced microcapsules (%)

ریزکپسول‌ها Microcapsules	ماده خشک DM	چربی Fat	پروتئین خام CP	ازت غیر پروتئینی NPN	پروتئین محلول Soluble protein	پروتئین متصل به دیواره سلولی NDIN	پروتئین متصل به لیگنین ADIN	کربوهیدرات کل Total Carbohydrate	کربوهیدرات غیر فیبری NFC	نشاسته Starch	قند Sugars	الیاف نامحلول در شوینده خنثی NDF	الیاف نامحلول در شوینده اسیدی ADF	خاکستر Ash
1	97.4	32.51^{c}	22.85 ^{a}	6.3^{ab}	26.4^{c}	14.5^{a}	11.7^{b}	43.7^{a}	80.9^{b}	28.4	53.9^{bc}	2.8	19.0^{b}	1.0^{a}
2	97.5	52.0^{b}	16.4 ^{b}	4.2^{b}	29.7^{b}	12.2^{b}	13.6^{ab}	30.8^{b}	81.8^{b}	29.8	52.9^{c}	3.3	18.2^{b}	0.8^{b}
3	97.4	67.0^{a}	11.8 ^{c}	5.5^{b}	26.9^{c}	11.9^{b}	14.4^{a}	20.2^{c}	79.5^{b}	23.6	56.2^{b}	3.8	20.5^{a}	1.0^{a}
4	97.6	32.2^{c}	23.0^{a}	7.1^{a}	36.7^{a}	4.1^{c}	2.1^{c}	43.9^{a}	91.9^{a}	26.4	64.6^{a}	3.6	8.0^{c}	1.0^{a}
5	97.6	52.0 ^{b}	16.2^{b}	7.7^{a}	35.3^{a}	3.9^{c}	2.1^{c}	30.7^{b}	91.8^{a}	27.9	64.8^{a}	2.8	81.2^{c}	1.1^{a}
6	97.7	68.6^{a}	10.6^{c}	6.6^{ab}	38.9^{a}	4.3^{c}	2.1^{c}	20.2^{c}	91.5^{a}	27.7	63.2^{a}	3.3	8.4^{c}	0.5^{b}
اشتباه معیار میانگین SEM	0.5	1.0	0.9	0.8	1.2	0.4	1.0	1.2	1.1	2.1	1.4	0.4	0.7	0.1

اعداد با حروف متفاوت از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با هم دارند. در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each column data with different superscripts are statistically different ($P < 0.05$). In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.
DM, Dry matter; CP, Crud protein; NPN, Non-protein nitrogen; NDIN, Neutral detergent insoluble crude protein; ADIN, Acid detergent insoluble crude protein; NFC, Non-fiber carbohydrates; NDF, Neutral detergent fiber; ADF, Acid detergent fiber

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی پودرها و امولسیون‌های تولیدی با استفاده از مواد دیواره‌ای میلارد و غیرمیلارد و روغن‌های ماهی و آفتابگردان

Table 3. Physical characteristics of fish and sunflower oil produced microcapsules and Emulsions with different wall material and oil to wall ratios

اندازه ذرات پودر تولیدی Reconstitute Powder particle size (µm)	اندازه ذرات امولسیون Emulsion particle size (µm)	اندازه ذرات میکروکپسول Microcapsule particle size (µm)	فعالیت آبی Water activity(aw)	وزن حجمی Volumetric weight (kg/m3)	بازده میکروکپسول Microcapsule Yield (%)	راندمان کپسولاسیون Encapsulation Efficiency (%)	ریزکپسول‌ها Microcapsules
0.42^{f}	0.42^{b}	3.2^{e}	0.15^{b}	303.9^{a}	98.4^{a}	98.0^{a}	1
0.74^{e}	0.41^{b}	3.1^{f}	0.16^{a}	301.6^{a}	94.4^{b}	99.0^{a}	2
1.5^{b}	0.45^{b}	4.4^{b}	0.16^{a}	280.6^{b}	78.1^{c}	62.5^{d}	3
0.85^{d}	0.42^{b}	3.6^{d}	0.15^{b}	297.2^{a}	93.1^{b}	89.4^{b}	4
1.1^{c}	0.42^{b}	3.9^{c}	0.12^{c}	262.3^{c}	67.6^{d}	66.5^{c}	5
3.3^{a}	0.49^{a}	5.8^{a}	0.11^{d}	249.3^{d}	48.8^{e}	42.2^{e}	6
0.005	0.003	0.014	0.0003	3.085	1.104	0.391	*اشتباه معیار میانگین* SEM

اعداد با حروف متفاوت از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با هم دارند. در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند .

In each column data with different superscripts are statistically different ($P < 0.05$). In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

در این میان استفاده از فرآیند فراصوت به‌منظور امولسیفه کردن امولسیون‌ها قبل از خشک‌کردن، تأثیر روشنی بر خصوصیات ریزکپسول‌های تولیدی داشت؛ بنابراین امولسیون‌های حاصل از اسیدهای چرب به‌منظور تولید ریزکپسول‌ها مورداستفاده قرار نگرفتند. میزان تولید ریزکپسول‌ها و نیز عملکرد ریزپوشانی و سایر شاخصه‌های فیزیکی موردبررسی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نسبت روغن به مواد پوشاننده قرار گرفت ولی نوع روغن مورداستفاده تأثیری بر شاخصه‌های فوق نداشت. بالاترین میزان تولید ریزکپسول و عملکرد ریزپوشانی مربوط به سیستم‌های دیواره‌ای میلارد بود.

جدول ۴ به بررسی میزان ویسکوزیته و وسعت واکنش میلارد در ریزکپسول‌های تولیدی و جدول ۵ به بررسی میزان تغییر در عملکرد ریزپوشانی ریزکپسول‌های تولید با گذشت زمان اختصاص دارد. در ارتباط با خصوصیات مورداشاره در جداول ۴ و ۵ با توجه به عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین ریزکپسول‌های حاصل از روغن ماهی و آفتابگردان، میانگین داده‌ها مورداستفاده قرار گرفت. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در این جدول، مقادیر بالای ماده خشک در پودرهای تولیدی را نشان‌دهنده مناسب بودن آن‌ها به‌منظور نگهداری در شرایط انباری دانست. به‌علاوه مقادیر اندک فعالیت آبی در پودرهای تولیدی تأییدی دیگر بر این ادعا است. در این میان تفاوتی بین پودرهای تولیدی با استفاده از مواد پوشاننده مختلف و یا با مقادیر مختلف روغن در میزان رطوبت موجود در پودرها وجود نداشت. اندازه پودرها، ذرات امولسیون‌ها و پودرهای خیسانده شده تابعی از میزان روغن بکار رفته در ترکیب آن‌ها و نوع ماده پوشاننده بود. با افزایش میزان روغن در ترکیب کپسول‌ها، اندازه ذرات در بخش‌های مختلف افزایش یافت. این امر بر رفتار حل شدن دوباره‌ی ریزکپسول‌ها در آب هم تأثیرگذار بوده و سبب افزایش اندازه ذرات شد. عملکرد کپسوله شدن روغن نیز تابعی از نوع مواد پوشاننده مورداستفاده و نیز میزان روغن موجود در ترکیب ریزکپسول‌ها بوده و همبستگی منفی بالایی با میزان تولید کپسول‌ها داشت. علاوه بر این موارد جرم حجمی پودرهای تولیدی هم تابعی از اندازه ذرات پودرها و امولسیون‌ها، نوع مواد پوشاننده و نسبت روغن موجود در ترکیب کپسول‌ها بود. در کلیه‌ی خصوصیات موردبررسی، در سطوح یکسان روغن، مواد دیواره‌ای میلارد بهترین عملکرد را داشتند ولی نوع روغن مورداستفاده تأثیری در خصوصیات ذکرشده ایجاد نکرد. کاهش عملکرد ریزپوشانی با گذشت زمان مترادف با راه یافتن بخشی از روغن به سطح ریزکپسول و قرار گرفتن آن در معرض اکسیداسیون محیطی است. در این میان ریزکپسول‌های تولیدی با استفاده از محصولات واکنش میلارد در سطوح مختلف روغن مورداستفاده توانایی بیشتری در حفظ عملکرد ریزپوشانی نسبت به مواد پوشاننده غیرمیلارد داشتند. سطح روغن مورداستفاده این خصوصیت را تحت تأثیر قرارداد ولی تفاوت معنی‌داری در ارتباط با نوع روغن مورداستفاده وجود نداشت.

وضعیت اکسیداتیو ریزکپسول‌های تولیدی بلافاصله پس از تولید در جدول ۶ گزارش‌شده است. علاوه بر نوع مواد پوشاننده و سطح روغن مورداستفاده، نوع روغن مورداستفاده نیز بخصوص در ارتباط با مواد پوشاننده غیرمیلارد دارای تأثیر معنی‌داری بود. شاخصه‌های مختلف اکسیداسیون نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ریزکپسول‌های روغن ماهی به آسیب اکسیداتیو طی فرآیند تولید است. مکمل‌های روغن ماهی دارای مقادیر بالاتر عدد پراکسید و آنیسیدین در مقایسه با مکمل‌های روغن آفتابگردان بودند ولی با این‌حال تفاوت معنی‌داری در میزان عدد تیوباربیتوریک اسید وجود نداشت.

جدول ٤- وسعت واکنش میلارد در مخلوط آبی مواد دیواره‌ای، امولسیون‌ها و پودرهای تهیه شده با روغن ماهی و آفتابگردان بوسیله اندازه‌گیری جذب در *nm* ٤٦٥

Table 4. Maillard reaction extent in wall material solutions, emulsions and microencapsulated powders using spectrophotometry in 465 nm

اشتباه معیار میانگین SEM	ریزکپسول ٦ Microcapsule 6	ریزکپسول ٥ Microcapsule 5	ریزکپسول ٤ Microcapsule 4	ریزکپسول ٣ Microcapsule 3	ریزکپسول ٢ Microcapsule 2	ریزکپسول ١ Microcapsule 1	
0.25	9.2^{f}	10.8^{e}	12.3^{d}	14.8^{c}	16.1^{b}	16.8^{a}	ویسکوزیته Viscosity (mPa s)
				میزان واکنش میلارد Millard reaction extent			
0.0012	0.01^{by}	0.01^{by}	0.01^{bz}	0.07^{a}	0.07^{az}	0.07^{az}	مواد محلول دیواره Wall material solutions
0.0014	0.01^{ey}	0.01^{dy}	0.02^{dy}	0.75^{c}	0.79^{by}	0.84^{ay}	امولسیون Emulsions
0.0012	0.02^{dx}	0.03^{dx}	0.03^{cx}	0.99^{b}	1.0^{bx}	1.21^{ax}	پودرهای میکرو کپسوله شده Microencapsulated powders
	0.001	0.0009	0.0011	0.0017	0.0016	0.0017	اشتباه معیار میانگین SEM

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) ($p<۰/۰۵$).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) ($P < 0.05$).

در هر ستون داده ها با اندیس متفاوت (x, y, z) از نظر آماری متفاوت هستند (در میکروکپسول های مختلف) ($p<۰/۰۵$).

In each column data with different superscripts (x, y, z) are statistically different (within different microcapsules) ($P < 0.05$).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ١-٣ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

محلول‌های مواد دیواره‌ای دارای ٢١ درصد مواد جامد هستند و جذب نور در رقت های ١ به ٢٠ اندازه گیری شد.

Wall material solutions have 21 % of solids light absorption was measured in 1:20 dilutions.

امولسیون ها و پودرها تا محلول‌های مواد دیواره با استفاده از آب دیونیزه رقیق شدند.

Emulsions and powders were diluted up to wall material solutions using deionized water.

جدول ۵- تأثیر زمان نگهداری بر میزان عملکرد کپسوله شدن در ریزکپسول‌های تولیدی با استفاده از انواع مواد دیواره‌ای میلارد و غیرمیلارد و روغن ماهی و آفتابگردان

Table 5. Effects of storage time in 25C on encapsulation efficiency of fish and sunflower oil produced microcapsules

اشتباه معیار میانگین SEM	راندمان ان-کپسولاسیون (درصد) Encapsulation Efficiency (%)				ریزکپسول‌ها Microcapsules
	روز ٤٥ Day 45	روز ۳۰ Day 30	روز ۱۵ Day 15	اولیه Initial	
0.235	83.1^{az}	87.1^{ay}	89.2^{ax}	98.0^{bw}	1
0.364	83.1^{ay}	84.1^{by}	86.1^{bx}	99.0^{aw}	2
0.216	40.0^{cz}	47.2^{dy}	55.1^{dx}	62.5^{dw}	3
0.672	53.2^{bz}	64.0^{cy}	73.1^{cx}	89.4^{cw}	4
0.537	32.1^{dz}	38.2^{ey}	43.1^{ex}	54.7^{ew}	5
0.363	21.6^{ez}	28.1^{fy}	39.9^{fx}	42.2^{fw}	6
	0.327	0.467	0.562	0.391	اشتباه معیار میانگین SEM

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) ($p<۰/۰۵$).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) ($P < 0.05$).

در هر ستون داده ها با اندیس متفاوت (x ,y ,z) از نظر آماری متفاوت هستند (در میکروکپسول های مختلف) ($p<۰/۰۵$).

In each column data with different superscripts (x, y, z) are statistically different (within different microcapsules) ($P < 0.05$).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

جدول ۶- وضعیت اکسیداتیو ریزکپسول‌های تولیدی روغن ماهی و آفتابگردان بلافاصله پس از تولید

Table 6. Oxidative statement of fish and sunflower oil produced microcapsules instantly after production

ریزکپسول‌ها Microcapsules	مقدار پراکسید Peroxide Value (meq/kg)	مقدار آنیسیدین Anisidine Value	تیوباربیتوریک TBAR(µmol/g)
میکروکپسول‌های حاوی روغن ماهی Fish oil loaded microcapsules			
1	1.8^{d}	7.5^{d}	1.6^{d}
2	1.8^{d}	7.1^{de}	2.5^{d}
3	6.2^{b}	7.9^{cd}	3.9^{c}
4	1.9^{d}	8.7^{c}	3.5^{d}
5	3.1^{c}	8.2^{c}	4.8^{d}
6	8.4^{a}	19.4^{a}	26.3^{a}
اشتباه معیار میانگین SEM	0.46	0.43	0.94
میکروکپسول‌های حاوی روغن آفتابگردان Sunflower oil loaded microcapsules			
1	1.5^{b}	2.9^{d}	1.2^{d}
2	1.6^{b}	4.0^{d}	2.2^{cd}
3	2.2^{b}	5.3^{b}	3.1^{b}
4	1.6^{b}	3.6^{c}	2.3^{c}
5	2.9^{ab}	4.9^{bc}	4.4^{b}
6	3.3^{a}	7.8^{a}	11.7^{a}
اشتباه معیار میانگین SEM	0.34	0.26	0.04

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) ($p<۰/۰۵$).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) ($P< 0.05$).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ۴-۶ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

الگوی اسیدهای چرب ریزکپسول‌ها و نمک‌های کلسیمی تولیدی با استفاده از روغن ماهی قبلاً گزارش‌شده است (Khalilvandi و همکاران، ۲۰۱۵). با این‌حال به‌منظور جلب‌توجه خوانندگان این اطلاعات در قالب جدول ۷ ارائه‌شده است. جدول ۸ نشان‌دهندهٔ الگوی اسیدهای چرب محصولات تولیدی با استفاده از روغن آفتابگردان است. ساخت نمک‌های کلسیمی منجر به ایجاد تأثیر منفی در ترکیب اسیدهای چرب غیراشباع در منابع مختلف روغنی مورداستفاده نشد. افزایش سطح روغن در امولسیون‌ها و نوع مواد پوشاننده بر غلظت انواع اسیدهای چرب علی‌الخصوص اسیدهای چرب غیراشباع با چند پیوند دوگانه تأثیرگذار بودند. تفاوت معنی‌داری بین غلظت انواع اسیدهای چرب در ساختار کپسول‌های تولیدی و امولسیون‌ها وجود داشت. ایجاد شرایط دمایی مشابه با ریزپوشانی در امولسیون‌ها در شرایط آزمایشگاهی (بدون ریزپوشانی)، منجر به کاهش بسیار شدیدتری در میزان اسیدهای چرب غیراشباع در مقایسه با ریزکپسول‌های تولیدی روغن ماهی و آفتابگردان شد. با وجود مقاومت بالاتر امولسیون‌های میلارد در مقایسه با امولسیون‌های غیرمیلارد در برابر کاهش اسیدهای چرب غیراشباع، این امر نشان‌دهنده عدم کفایت تهیه امولسیون در برابر ریزکپسوله کردن در

محافظت اکسیداسیونی اسیدهای چرب غیراشباع است.

با توجه به این‌که مواد مورداستفاده در تهیه مواد پوشاننده شامل مالتودکسترین و پودر گلوکز با خلوص بالا بودند، ایجاد محصولات واکنش میلارد در فرایند تهیه مواد دیواره‌ای میلارد و فرایند خشک‌کردن محصولات را می‌توان دلیل بازیابی بخشی از کربوهیدرات‌ها در این دو بخش دانست. گزارشات مختلفی در زمینه بازیابی محصولات واکنش میلارد به‌صورت لیگنین یا سایر ترکیبات دیواره سلولی وجود دارد (Licitra و همکاران، ۱۹۹۶؛ Soest Van و همکاران، ۱۹۹۱). متأسفانه در حال حاضر گزارش مشابهی به‌منظور مقایسه نتایج وجود ندارد. باتوجه به این‌که حرارت نسبتاً بالایی در جریان فرایند خشک‌کردن امولسیون به آن وارد می‌شود (۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)، این مرحله نیز می‌تواند در شکل‌گیری محصولات میلارد مؤثر باشد. وجود ترکیبات دیواره سلولی گیاهی موجود در ساختار ریزکپسول‌های واکنش میلارد در اثر تحریک واکنش میلارد قبل و در حین خشک نمودن، می‌تواند به‌عنوان عاملی بالقوه در جهت تغییر در میزان یا محل آزادسازی روغن موجود در ترکیب ریزکپسول‌ها (با توجه به رفتار متفاوت آن‌ها در محیط‌های هضمی دستگاه گوارش) مورداستفاده قرار گیرد. باتوجه به این‌که مواد مورداستفاده در تهیه مواد پوشاننده شامل مالتودکسترین و پودر گلوکز با خلوص بالا بودند، ایجاد محصولات واکنش میلارد در فرایند تهیه مواد دیواره‌ای میلارد و فرایند خشک‌کردن محصولات را می‌توان دلیل بازیابی بخشی از کربوهیدرات‌ها در این دو بخش دانست. گزارشات مختلفی در زمینه بازیابی محصولات واکنش میلارد به‌صورت لیگنین یا سایر ترکیبات دیواره سلولی وجود دارد (Licitra و همکاران، ۱۹۹۶؛ Van Soest و همکاران، ۱۹۹۱).

در سطوح یکسان روغن، تفاوت معنی‌داری بین اندازه ذرات امولسیون‌ها و اندازه ذرات ریزکپسول‌های تولیدی بین ترکیبات میلارد و غیرمیلارد وجود نداشت. با این‌حال روندی برای معنی‌داری در اندازه ذرات کوچک‌تر برای محصولات میلارد وجود داشت که می‌توان آن را به‌خصوصیات امولسیفایری محصولات میلارد نسبت داد که در نهایت منجر به تولید ریزکپسول‌های ریزتر شده است. در مطالعه Kosaraju و همکاران (۲۰۰۹) در دو سطح روغن ۲۵ و ۴۰ درصد تفاوتی بین محصولات دیواره‌ای میلارد و غیرمیلارد در اندازه ذرات امولسیون‌ها وجود نداشت. افزایش میزان روغن موجود در ترکیب امولسیون‌ها سبب افزایش اندازه ذرات امولسیون‌ها و متعاقباً پودرهای تولیدی شد که با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران توافق دارد (Jafari و همکاران، ۲۰۰۸؛ McClements ۲۰۰۵). بالاترین میزان تولید ریزکپسول و نیز بالاترین میزان عملکرد کپسوله شدن مربوط به سیستم‌های دیواره‌ای میلارد بود. کاهش میزان تولید ریزکپسول با افزایش غلظت روغن در امولسیون را می‌توان با اثر چسبانندگی روغن کپسوله نشده به سطح داخلی دستگاه در اثر ناکافی بودن مواد پوشاننده توجیه کرد (Tan و همکاران، ۲۰۰۵).

به‌علاوه این امر سبب کاهش عملکرد کپسوله شدن و افزایش اکسیداسیون روغن در اثر افزایش روغن سطحی در ریزکپسول‌ها نیز می‌شود. گزارشات کمی در زمینه مقایسه انواع مواد پوشاننده میلارد و غیرمیلارد وجود دارد. Augustin و همکاران (۲۰۰۶) و Kosaraju و همکاران (۲۰۰۹) از مواد پوشاننده میلارد در کپسوله کردن روغن ماهی استفاده کردند.

جدول ۷- ترکیب اسیدهای چرب موجود در روغن ماهی و ریزکپسول‌های تولیدی بلافاصله پس از تولید

Table 7. Fatty acid profile of fish oil & fish oil produced microcapsules instantly after production

اشتباه معیار میانگین SEM	ریزکپسول ٦ Microcapsule 6	ریزکپسول ٥ Microcapsule 5	ریزکپسول ٤ Microcapsule 4	ریزکپسول ٣ Microcapsule 3	ریزکپسول ٢ Microcapsule 2	ریزکپسول ١ Microcapsule 1	نمک کلسیمی روغن ماهی Fish oil- ca salts	روغن ماهی Fish oil	
0.003	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	0.18	12:0
0.03	1.2	1.3	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	14:0
0.64	2.5	2.4	2.1	2.2	2.5	2.1	2.1	2.1	15:0
0.09	3.7^{a}	3.5^{a}	3.1^{b}	3.8^{a}	3.2^{b}	3.1^{b}	3.0^{b}	3.1^{b}	16:0
0.12	3.9	4.2	4.1	4.2	4.3	4.1	4.1	4.1	16:1 cis-9
0.15	5.1	5.8	5.1	5.3	5.3	5.1	5.1	5.1	16:2
0.18	6.2	6.2	6.1	6.3	5.9	6.1	6.0	6.1	16:4n-3
0.21	7.4	7.1	7.1	7.40	6.9	7.1	7.0	7.1	17:0
0.36	9.2	8.6	8.6	9.8	8.7	8.5	8.3	8.1	18:0
0.65	21.1^{c}	23.0^{b}	26.4^{a}	21.7^{bc}	25.4^{a}	26.2^{a}	25.9^{a}	26.1^{a}	18:1 cis-9
0.06	1.3	1.2	1.386	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	18:1 trans
0.01	0.22^{c}	0.27^{b}	0.35^{a}	0.33^{a}	0.35^{a}	0.37^{a}	0.36^{a}	0.3^{a}	18:2n-4
0.09	1.4^{c}	1.5^{c}	1.1^{a}	1.7^{b}	1.9^{a}	1.9^{a}	2.0^{a}	2.0^{a}	18:2n-6
0.09	1.7	1.8^{b}	2.4^{a}	2.1^{a}	2.4^{a}	2.5^{a}	2.7^{a}	2.5^{a}	18:3n-3
0.13	1.9^{c}	2.5^{b}	3.03^{a}	2.6^{b}	3.0^{a}	3.1^{a}	3.1^{a}	3.1^{a}	18:4n-3
0.01	0.15	0.14	0.16	0.14	0.16	0.17	0.16	0.16	20:00
0.05	0.99^{b}	1.0^{b}	1.2^{a}	1.0^{b}	1.2^{a}	1.2^{a}	1.2^{a}	1.2^{a}	20:1cis
0.03	0.54	0.64^{c}	0.85^{a}	0.73^{b}	0.86^{a}	0.88^{a}	0.88^{a}	0.88^{a}	20:4n-3
0.03	0.6^{c}	0.5^{c}	0.76^{a}	0.64^{b}	0.76^{a}	0.78^{a}	0.78^{a}	0.78^{a}	20:4n-6
0.37	6.1^{d}	7.2^{c}	9.6^{a}	8.2^{b}	9.6^{a}	9.9^{a}	9.9^{a}	9.8^{a}	20:5n-3
0.01	0.24	0.22	0.23	0.22	0.23	0.24	0.23	0.23	22:1 cis
0.07	1.1^{c}	1.3^{b}	1.6^{a}	1.4^{b}	1.7^{a}	1.6^{a}	1.7^{a}	1.7^{a}	22:5n-3
0.34	6.3^{d}	7.4^{c}	9.8^{a}	8.4^{b}	9.8^{a}	10.0^{a}	10.2^{a}	10.2^{a}	22:6n-3
0.33	1.3	1.6	1.8	1.8	1.9	1.6	2.0	2.1	Other
0.69	24.4	24.2	22.5	23.1	22.8	22.3	22.0	21.8	SFA
0.73	28.8^{b}	30.8^{ab}	33.3^{a}	30.4^{b}	32.8^{a}	33.2^{a}	32.9^{a}	33.1^{a}	MUFA
0.85	32.7^{d}	35.7^{c}	40.8^{a}	38.8^{b}	41.2^{a}	41.5^{a}	41.9^{a}	41.8^{a}	PUFA

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) ($p<۰/۰۵$).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) ($P < 0.05$).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

جدول ۸- ترکیب اسیدهای چرب موجود در روغن آفتابگردان و ریزکپسول‌های تولیدی بلافاصله پس از تولید

Table 8. Fatty acid profile of sunflower oil & microencapsulated sunflower oil immediately after production

اسیدهای چرب FA	روغن آفتابگردان Sunoil	نمک‌های کلسیمی روغن آفتابگردان Sunoil- ca salts	ریزکپسول ۱ Microcapsule 1	ریزکپسول ۲ Microcapsule 2	ریزکپسول ۳ Microcapsule 3	ریزکپسول ٤ Microcapsule 4	ریزکپسول ٥ Microcapsule 5	ریزکپسول ٦ Microcapsule 6	اشتباه معیار میانگین SEM
12:0	0.354	0.3564	0.355	0.355	0.355	0.356	0.411	0.412	0.038
14:0	0.126	0.116	0.127	0.139	0.146	0.128	0.142	0.153	0.034
15:0	1.114	1.120	1.12	1.165	1.195	1.126	1.192	1.225	0.440
16:0	2.143	2.153	2.16	2.185	2.195	2.158	2.174	2.195	0.394
16:1 cis-9	1.235	1.25	1.24	1.203	1.280	1.244	1.255	1.266	0.114
16:2	0.352	0.34	0.347	0.347	0.323	0.345	0.309	0.288	0.117
16:4n-3	0.375	0.374	0.375	0.375	0.374	0.374	0.331	0.331	0.125
17:0	2.311	2.42	2.32	2.417	2.477	2.330	2.495	2.583	0.215
18:0	7.463 ^{c}	7.78 ^{c}	8.07 ^{c}	8.191 ^{bc}	11.123 ^{a}	8.582 ^{bc}	10.275 ^{b}	13.127 ^{a}	1.365
18:1 cis-9	15.357 ^{a}	15.13^{a}	15.43^{a}	14.95^{ab}	13.352 ^{c}	15.2^{a}	14.5^{bc}	13.749 ^{c}	0.655
18:1 trans	0.275	0.269	0.275	0.271	0.258	0.273	0.258	0.259	0.160
18:2n-4	0.251	0.251	0.249	0.245	0.222	0.244	0.202	0.182	0.023
18:2n-6	59.364 ^{a}	58.574 ^{a}	57.74^{a}	58.158 ^{a}	55.638 ^{b}	56.3^{b}	54.411 ^{b}	53.587 ^{b}	1.351
18:3n-3	8.114 ^{a}	7.844 ^{a}	8.024 ^{a}	7.880 ^{a}	6.950 ^{b}	7.79^{a}	6.420 ^{b}	6.162 ^{b}	0.647
18:4n-3	1.053	1.052	1.046	1.047	1.030	1.046	1.019	1.007	0.134
Other	1.113	0.973	2.123	1.077	3.087	2.456	4.655	3.481	0.053
SFA	13.511 ^{c}	13.95^{c}	14.153 ^{c}	14.451 ^{c}	17.5^{b}	14.7^{c}	16.690 ^{b}	19.696 ^{a}	0.853
MUFA	16.868 ^{a}	16.643 ^{a}	16.945 ^{a}	16.420 ^{a}	14.890 ^{b}	16.72 ^{a}	15.974 ^{ab}	15.274 ^{ab}	0.784
PUFA	69.868 ^{a}	68.437 ^{a}	67.779 ^{a}	68.051 ^{a}	64.538 ^{b}	66.135 ^{ab}	62.692 ^{b}	61.375 ^{b}	1.213

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) (p<۰/۰۵).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) ($P < 0.05$).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

نتایج Kosaraju و همکاران (۲۰۰۹) نشان‌دهنده عملکرد برابر مواد پوشاننده میلارد و غیرمیلارد در کپسوله کردن روغن ماهی در مقادیر ۲۵ و ۵۰ درصد روغن بود که با نتایج حاصل از این مطالعه هم همخوانی دارد. در این مطالعه با وجود کاهش عملکرد کپسوله شدن در اثر استفاده از سطوح بالاتر روغن در هر دو نوع مواد پوشاننده، میزان عملکرد مواد میلارد به‌صورت معنی‌داری بیشتر از مواد غیر میلارد بود. این امر را می‌توان با استفاده از خصوصیات امولسیفایری مواد میلارد توجیه کرد که سبب توزیع یکنواخت‌تر روغن در امولسیون شده و علاوه‌بر ایجاد امولسیون پایدارتر، سبب افزایش عملکرد کپسوله شدن می‌شوند (Oliver و همکاران، ۲۰۰۶؛ Dickinson، ۲۰۰۹). پایدارتر بودن امولسیون‌های تهیه‌شده با محصولات واکنش میلارد توسط Al-Hakkak و Al-Hakkak (۲۰۱۰) گزارش‌شده است. Aghbashlo و همکاران (۲۰۱۲) بالاتر بودن ویسکوزیته امولسیون را یکی از دلایل بالاتر بودن عملکرد کپسوله شدن دانستند. این مطلب کاملاً با نتایج مطالعه اخیر مبنی بر بالاتر بودن عملکرد کپسوله شدن در امولسیون‌های تهیه‌شده با مواد میلارد که دارای بالاترین میزان ویسکوزیتی بودند، همخوانی دارد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وسعت واکنش‌های میلارد، ویسکوزیته امولسیون‌ها، عملکرد کپسوله شدن و تولید ریزکپسول‌ها وجود دارد. به‌علاوه کلیه‌ی موارد فوق‌الذکر همبستگی مثبت و معنی‌داری با میزان مقاومت اکسیداسیونی داشتند که در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. کاهش عملکرد کپسوله شدن با افزایش زمان نگهداری ریزکپسول‌ها توسط Aghbashlo و همکاران (۲۰۱۲) در ارتباط با ریزکپسول‌های روغن ماهی تهیه‌شده با شیرخشک بدون چربی گزارش‌شده است. در تحقیق حاضر افزایش زمان نگهداری کپسول‌ها سبب افزایش روغن سطحی آن‌ها شد ولی با این‌حال میزان کاهش در عملکرد کپسوله شدن در پودرهای حاصل از محصولات واکنش میلارد کمتر از مواد غیرمیلارد بود. علاوه‌بر این افزایش روغن موجود در ترکیب کپسول‌ها هم این امر را تحت تأثیر قرارداد. کاهش کمتر عملکرد کپسوله شدن در محصولات واکنش میلارد را می‌توان به بالاتر بودن عملکرد کپسوله شدن در ابتدا و نیز بالاتر بودن ویسکوزیته امولسیون‌های میلارد در مقایسه با مواد غیرمیلارد نسبت داد. بالاتر بودن ویسکوزیته مواد کپسوله شده می‌تواند باعث کاهش میزان نشت مواد کپسوله‌شده به سمت دیواره کپسول شده و در نتیجه سبب حفظ عملکرد بالاتر کپسوله شدن شود. این امر در نهایت منجر به بالاتر بودن مقاومت اکسیداتیو ریزکپسول‌های میلارد شد که در بخش‌های بعدی موردبررسی قرار خواهد گرفت.

اکسیداسیون کمتر روغن کپسوله شده در مقایسه با روغن یا اسیدهای چرب آزاد در شرایط بدون پوشش و حرارت دهی مشابه با حرارت ایجادشده در شرایط خشک‌کردن به دلیل اثرات محافظت‌کنندگی فرایند ریزکپسوله کردن بوده است (Calvo و همکاران، ۲۰۱۰؛Polavarapu و همکاران، ۲۰۱۱). بالاتر بودن میزان اکسیداسیون اسیدهای چرب آزاد محافظت نشده در مقایسه با روغن ماهی بدون پوشش در این آزمایش را می‌توان به دلیل حساسیت بیشتر اسیدهای چرب آزاد در مقایسه با اسیدهای چرب استریفه در برابر اکسیداسیون و اثرات پیش‌اکسیداتیو آن‌ها دانست (Miyashita و همکاران، ۱۹۹۱). پایین‌ترین میزان عدد پراکسید در بین مواد فرآوری شده مربوط به ریزکپسول‌های میلارد و بالاترین میزان مربوط به مواد پوشانده غیرمیلارد بوده و در این بین میزان روغن تأثیر معنی‌داری داشت. بالاتر بودن میزان اکسیداسیون در ریزکپسول‌های غیرمیلارد را می‌توان با بالابودن میزان روغن سطحی و یا کاهش عملکرد

کپسوله شدن توجیه کرد که با افزایش نسبت روغن به مواد پوشاننده در ریزکپسول‌های میلارد هم مشاهده می‌شود (Velasco و همکاران، ۲۰۰۰). محققین مختلفی (Augustin MA و Sanguansri، ۲۰۰۹؛ Chen و Kitts، ۲۰۰۸) به خصوصیات آنتی‌اکسیدانی مواد میلارد اشاره‌کرده‌اند که این امر در راستای محافظت بهتر اسیدهای چرب در برابر اکسیداسیون در طی انجام فرآیند خشک‌کردن توسط پوشش‌های میلارد در این آزمایش می‌باشد. پایین‌تر بودن میزان شاخصه‌های مختلف اکسیداسیون در امولسیون‌ها در مقایسه با کپسول‌های تولیدی بلافاصله پس از تولید، نشان‌دهنده تأثیر حرارت دهی در حین خشک‌کردن بر اکسید شدن روغن موجود در ساختار کپسول‌ها است. حساسیت بیشتر کپسول‌های روغن ماهی در برابر اکسیداسیون در مقایسه با کپسول‌های تولیدی از روغن آفتابگردان بخصوص در مقادیر بالای روغن در ساختار کپسول‌ها، نشان‌دهنده افزایش حساسیت به اکسیداسیون با افزایش تعداد پیوندهای دوگانه است. با این‌حال این اثرات تحت تأثیر سطح روغن و نوع مواد دیواره‌ای قرار گرفت. این امر تأییدی بر قابلیت بالای آنتی‌اکسیدانی محصولات واکنش میلارد بود. برخی از تیمارهای مربوط به فرایند ریزکپسوله کردن سبب کاهش اسیدهای چرب غیراشباع شده‌اند. تغییر در پروفیل اسیدهای چرب در تیمارهایی مشاهده شده است که در آن‌ها میزان عملکرد کپسوله کردن پایین‌تر بوده است. این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که عملکرد کمتر کپسوله‌کردن سبب افزایش میزان روغن سطحی شده و این امر زمینه را برای اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع در دمای بالا فراهم آورده است. Kowalski (۲۰۰۷) عنوان کرد که حرارت دادن روغن زیتون و آفتابگردان سبب کاهش میزان کل اسیدهای چرب و نیز کاهش غلظت اسیدهای چرب غیراشباع نسبت به کل اسیدهای چرب می‌شود. در این میان بیشترین میزان تأثیر مربوط به مواد پوشاننده غیرمیلارد بوده و این روند با افزایش نسبت روغن به مواد پوشاننده و در نتیجه افزایش میزان روغن سطحی تشدید می‌شود. علاوه بر این حساسیت بالاتر روغن ماهی نسبت به اکسیداسیون در مقایسه با روغن آفتابگردان در نتایج مشخص است که با گزارش‌های پیشین در این خصوص همخوانی دارد؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که انتخاب سطح بهینه روغن و مواد پوشاننده در استفاده کارآمد از ریزپوشانی ضروری است. عملکرد مناسب‌تر سیستم‌های پوشاننده میلارد را می‌توان علاوه بر عملکرد کپسوله شدن، به اثرات آنتی‌اکسیدانی محصولات میلارد و در نتیجه کاهش اکسیداسیون در حین فرایند خشک‌کردن نسبت داد. Barroso و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی اثر ریزپوشانی روغن کتان با استفاده از مواد پوشاننده نشاسته‌ای نیز کاهش در میزان اسیدهای چرب غیراشباع و افزایش اسیدهای چرب اشباع را گزارش کرده است. عدم تغییر در ترکیب اسیدهای چرب در فرایند تولید نمک‌های کلسیمی باوجود استفاده از دماهای بالاتر در مقایسه با تولید ریزکپسول‌ها را می‌توان در اثر به‌کارگیری محیط خنثی با استفاده از گاز آرگون دانست. درحالی‌که در ریزکپسوله کردن از هوا به‌عنوان محیط واکنش استفاده‌شده است. تفاوت‌های موجود در ارتباط با حساسیت به اکسیداسیون بین روغن ماهی و آفتابگردان می‌تواند توجیه‌گر تغییرات کمتر مشاهده‌شده در ترکیب اسیدهای چرب در مکمل‌های ریزکپسوله شده روغن آفتابگردان در مقایسه با روغن ماهی باشد. با این‌حال در ارتباط با محصولات تولیدی با استفاده از هر دو منبع روغنی باید توجه داشت که کپسوله کردن مانع از تغییرات وسیع در مقدار و ترکیب اسیدهای چرب در مقایسه با روغن‌ها و اسیدهای چرب آزاد یا امولسیون‌های خشک نشده

حرارت داده‌شده در شرایط مشابه با فرایند خشک‌کردن است. این امر نشان‌دهنده اهمیت خشک‌کردن امولسیون‌ها در حفظ پروفیل اسیدهای چرب در برابر آسیب‌های محیطی در مقایسه با استفاده از امولسیون‌های خشک نشده است. این امر به‌خوبی در مقایسه میزان تغییرات اسیدهای چرب غیراشباع در ترکیب پودرهای خشک‌شده و امولسیون‌های خشک نشده حرارت دیده قابل‌مشاهده است.

مقاومت اکسیداتیو: در این مطالعه ارزیابی میزان مقاومت به اکسیداسیون با قرارگیری در معرض دماهای مختلف در فواصل زمانی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. تولید نمک‌های کلسیمی از هر دو منبع روغنی سبب افزایش مقاومت در برابر اکسیداسیون شد. با این‌حال میزان مقاومت روغن‌ها یا اسیدهای چرب غیراشباع ریزکپسوله شده در برابر اکسیداسیون به سطح روغن موجود در مکمل و عملکرد کپسوله شدن بستگی داشت. عملکرد کپسوله شدن به‌نوبه خود تحت تأثیر نوع مواد دیواره‌ای مورداستفاده در پوشش دهی قرار داشت. مکمل‌های ریزکپسوله روغن ماهی و آفتابگردان در شرایط دمایی متفاوت و در زمان‌های مختلف نگهداری شدند. جدول ۹ نشان‌دهندهٔ عدد پراکسید ریزکپسول‌های روغن ماهی در دماها و زمان‌های مختلف است. میزان اکسیداسیون در هر منبع روغنی تحت تأثیر دما، زمان نگهداری، نوع مواد پوشاننده، سطح روغن موجود در ترکیب ریزکپسول‌ها و سطح مواد معدنی قرار گرفت. علاوه بر این تفاوت معنی‌داری بین ریزکپسول‌های ماهی و آفتابگردان در حساسیت اکسیداتیو وجود داشت. جدول ۱۰ نشان‌دهنده میزان اکسیداسیون در امولسیون‌های خشک نشده نگهداری شده در شرایط مشابه با ریزکپسول‌ها بود. افزایش قابل‌ملاحظه در عدد پراکسید در امولسیون‌های خشک نشده در مقایسه با پودرهای متناظر آن، نشان‌دهندهٔ اهمیت فرآیند خشک‌کردن امولسیون در ایجاد مقاومت اکسیداسیونی است.

در کلیه سیستم‌های محافظتی مورداستفاده، روغن ماهی دارای حساسیت به اکسیداسیون بیشتری نسبت به روغن آفتابگردان بود. وجود مقادیر بیشتری اسیدهای چرب با چندین پیوند دوگانه را می‌توان از مهم‌ترین دلایل این امر دانست. در ارتباط با مکمل‌های ریزکپسوله فرایند خشک‌کردن امولسیون‌ها با استفاده از فرایند خشک‌کن پاششی دارای نقش قابل‌ملاحظه‌ای در فرایند ایجاد مقاومت در برابر اکسیداسیون نسبت به روغن یا اسیدهای چرب کپسوله نشده و یا امولسیون‌های خشک نشده داشت. اکسیداسیون کمتر روغن کپسوله شده در مقایسه با روغن یا اسیدهای چرب آزاد در شرایط بدون پوشش به دلیل اثرات محافظت‌کنندگی فرایند ریزکپسوله کردن بوده است (Calvo و همکاران، ۲۰۱۰؛ Polavarapu و همکاران، ۲۰۱۱). بالاتر بودن میزان اکسیداسیون اسیدهای چرب آزاد محافظت نشده در مقایسه با روغن ماهی بدون پوشش در این آزمایش را می‌توان به دلیل حساسیت بیشتر اسیدهای چرب آزاد در مقایسه با اسیدهای چرب استریفه در برابر اکسیداسیون و اثرات پیش‌اکسیداتیو آن‌ها دانست (Miyashita و همکاران، ۱۹۹۱).

جدول ۹- مقاومت اکسیداتیو میکروکپسول‌های روغن ماهی و آفتابگردان تهیه شده با مواد دیواره‌ای مختلف نگهداری شده با و بدون مواد معدنی در شرایط دمایی مختلف (عدد پراکسید، میلی اکی‌والان بر کیلوگرم روغن)

Table 9. Oxidative stability of fish & sunflower oil microcapsules stored with and without mineral supplements in different time and temperatures (P.V. mEq/kg oil)

	Day 1515 روز				Day 3030 روز				Day 4545 روز			
	25		60		25		60		25		60	
	ریزکپسول Microcapsule	مواد معدنی Minerals	ریزکپسول Microcapsule	مواد معدنی Minerals	ریزکپسول Microcapsule	مواد معدنی Minerals	ریزکپسول Microcapsule	مواد معدنی Minerals	ریزکپسول Microcapsule	مواد معدنی Minerals	ریزکپسول Microcapsule	مواد معدنی Minerals
						روغن ماهی Fish Oil						
روغن Oil	4.5^{a}	14.1^{a}	19.4^{a}	27.6^{a}	15.7^{a}	24.1^{a}	27.8^{a}	39.5^{a}	24.3^{a}	35.5^{a}	42.9^{a}	57.9^{a}
نمک کلسیمی Ca-salt	2.1^{c}	3.1^{g}	4.1^{g}	5.25^{h}	3.4^{f}	4.75 ^{f}	4.2^{h}	5.4^{i}	4.15 ^{h}	4.9^{h}	6.1^{i}	7.8^{k}
ریز کپسول ۱ Microcapsule 1	3.1^{bc}	3.2^{g}	5.1^{g}	9.55^{g}	5.3^{e}	6.80 ^{e}	12.1^{f}	13.8^{gh}	7.10 ^{g}	9.0^{g}	14.2^{g}	16.4^{ij}
ریز کپسول ۲ Microcapsule 2	2.9^{bc}	3.2^{g}	6.9^{ef}	11.1^{f}	6.1^{e}	7.10 ^{e}	12.7^{ef}	14.8^{g}	9.90 ^{f}	11.8^{f}	16.3^{f}	17.2^{i}
ریز کپسول۳ Microcapsule 3	4.1^{a}	8.6^{c}	7.9^{e}	14.0^{e}	8.0^{d}	8.65 ^{d}	11.4^{fg}	15.9^{fg}	13.9^{de}	17.1^{e}	18.3^{e}	20.4^{gh}
ریز کپسول٤ Microcapsule 4	2.9^{bc}	4.9^{f}	8.8^{de}	13.6^{e}	9.2^{cd}	9.40 ^{d}	13.5^{e}	17.6^{ef}	15.3^{d}	19.8^{d}	17.3^{e}	22.6^{fg}
ریز کپسول ٥ Microcapsule 5	3.5^{b}	4.0^{fg}	16.7^{b}	18.9^{c}	10.4^{c}	10.8^{c}	20.0^{c}	23.5^{c}	17.5^{c}	25.1^{c}	21.3^{d}	28.2^{e}
ریز کپسول٦ Microcapsule 6	4.6^{a}	12.1^{b}	17.7^{b}	23.3^{b}	11.9^{b}	13.4^{b}	22.7^{b}	36.4^{b}	21.0^{b}	28.9^{b}	28.4^{b}	39.6^{b}
						روغن آفتابگردان Sunflower Oil						
روغن Oil	3.4^{b}	7.1^{d}	12.2^{c}	16.2^{d}	9.5^{cd}	12.1^{b}	18.2^{d}	24.5^{c}	12.7^{e}	16.7e	29.3^{b}	35.4^{c}
نمک کلسیمی Ca-salt	1.8^{c}	2.2^{g}	3.2^{h}	3.5^{i}	2.1^{g}	3.5^{f}	3.8^{h}	4.1^{i}	2.5^{i}	3.6^{h}	4.2 ^{j}	4.8^{l}
ریز کپسول ۱ Microcapsule 1	2.3^{c}	2.8^{g}	4.1^{g}	8.7^{g}	4.5^{ef}	5.9^{ef}	10.4^{g}	12.1^{h}	6.9^{g}	7.9^{g}	11.8^{h}	15.4^{j}
ریز کپسول۲ Microcapsule 2	2.8^{b}	2.84 ^{g}	6.0^{f}	10.3^{fg}	5.3^{e}	7.5^{e}	10.4^{g}	13.2^{h}	6.9^{g}	8.9^{g}	13.1^{g}	17.6^{i}
ریز کپسول۳ Microcapsule 3	4.7^{a}	7.97 ^{c}	9.8^{d}	13.1^{e}	7.1^{de}	7.9^{e}	13.9^{e}	16.7^{f}	8.7^{fg}	12.8^{f}	13.9^{g}	21.4^{g}
ریز کپسول٤ Microcapsule 4	3.2^{b}	3.46 ^{g}	7.7^{e}	12.7^{ef}	8.2^{cd}	8.9^{d}	12.5^{f}	18.7^{e}	7.9^{g}	9.8^{g}	17.7^{e}	19.7^{h}
ریز کپسول ٥ Microcapsule 5	3.1^{b}	5.59 ^{e}	10.0^{d}	13.3^{e}	8.3^{cd}	9.9^{cd}	17.2^{d}	21.2^{d}	12.2^{f}	16.1^{e}	25.5^{e}	33.7^{d}
ریز کپسول٦ Microcapsule 6	4.1^{a}	6.9^{d}	11.1^{cd}	14.0^{e}	8.8^{cd}	11.1^{bc}	17.5^{d}	22.3^{cd}	10.2^{f}	16.1^{e}	25.5^{e}	33.7^{d}

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) (p<۰/۰۵).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) (P < 0.05).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

جدول ۱۰- مقاومت اکسیداتیو امولسیون‌های خشک نشده روغن ماهی و آفتابگردان تهیه شده با مواد دیواره‌ای مختلف نگهداری شده در شرایط دمایی مختلف (عدد پراکسید، میلی اکی‌والان بر کیلوگرم روغن)

Table10. Oxidative stability of fish & sunflower oil emulsions stored in different time and *temperatures* (P.V. mEq/kg oil)

Day 45 روز ٤٥		Day 30 روز ۳۰		Day 15 روز ۱۵		
60	25	60	25	60	25	
Fish Oil روغن ماهی						
42.8^{ab}	24.3^{a}	25.8^{a}	15.7^{a}	19.4^{a}	4.6^{b}	Oil روغن
41.7^{b}	20.4^{c}	22.5^{c}	10.3^{c}	12.3^{cd}	2.7^{d}	ریز کپسول ۱ Microcapsule 1
41.3^{b}	22.4^{ab}	23.0^{bc}	12.4^{b}	13.9^{bc}	3.3^{cd}	ریز کپسول۲ Microcapsule 2
43.3^{a}	24.2^{a}	24.3^{ab}	12.8^{b}	14.4^{b}	5.3^{ab}	ریز کپسول۳ Microcapsule 3
42.7^{ab}	21.1^{bc}	23.0^{bc}	15.4^{a}	12.4^{cd}	4.0^{bc}	ریز کپسول٤ Microcapsule 4
43.0^{ab}	23.9^{a}	25.1^{a}	15.2^{a}	13.7^{bc}	4.4^{b}	ریز کپسول ٥ Microcapsule 5
43.9^{a}	24.3^{a}	26.3^{a}	16.9^{a}	19.2^{a}	6.1^{a}	ریز کپسول٦ Microcapsule 6
Sunflower Oil روغن آفتابگردان						
29.3^{d}	12.7^{d}	18.2^{d}	9.4^{cd}	12.1^{cd}	3.4^{cd}	Oil روغن
28.5^{d}	10.4^{e}	17.3^{d}	7.0^{d}	8.9^{e}	2.2^{d}	ریز کپسول ۱ Microcapsule 1
29.1^{d}	11.5^{de}	18.6^{d}	8.5^{d}	9.5^{e}	2.2^{d}	ریز کپسول۲ Microcapsule 2
29.3^{d}	11.7^{de}	18.4^{d}	9.2^{cd}	9.2^{e}	3.4^{cd}	ریزکپسول۳ Microcapsule 3
28.9^{d}	12.5^{d}	18.8^{d}	10.7^{c}	11.1^{d}	3.3^{cd}	ریزکپسول٤ Microcapsule 4
29.1^{d}	12.1^{d}	19.0^{d}	10.1^{c}	11.3^{d}	4.2^{bc}	ریز کپسول ٥ Microcapsule 5
31.6^{c}	13.4^{d}	18.4^{d}	10.0^{c}	12.7^{cd}	4.5^{b}	ریز کپسول٦ Microcapsule 6

در هر ردیف داده‌های با اندیس متفاوت (a, b, c) از نظر آماری متفاوت هستند (در انواع مختلف هر ماده) ($p<۰/۰۵$).

In each row data with different superscripts (a, b, c) are statistically different (within different types of each material) ($P < 0.05$).

در هر ستون داده ها با اندیس متفاوت (x ,y ,z) از نظر آماری متفاوت هستند (در میکروکپسول های مختلف) ($p<۰/۰۵$).

In each column data with different superscripts (x, y, z) are statistically different (within different microcapsules) ($P < 0.05$).

در هر یک از منابع روغن، میکروکپسول ۱-۳ از محصولات واکنش میلارد و میکروکپسول ٤-٦ از مواد مشابه اما ترکیبات فیزیکی بدون شرایط میلارد ساخته شده بودند.

In each of oil sources Microcapsule 1-3 were made of Maillard reaction products and Microcapsule 4-6 were made of same materials but just physical blends without Maillard conditions.

پایین‌ترین میزان عدد پراکسید در بین مواد فرآوری شده مربوط به ریزکپسول‌های میلارد و بالاترین میزان مربوط به مواد پوشانده غیرمیلارد بوده و در این بین میزان روغن تأثیر معنی‌داری داشت. بالاتر بودن میزان اکسیداسیون در ریزکپسول‌های غیرمیلارد را می‌توان با بالابودن میزان روغن سطحی و یا کاهش عملکرد کپسوله شدن توجیه کرد که با افزایش نسبت روغن به مواد پوشاننده در ریزکپسول‌های میلارد هم مشاهده می‌شود (Velasco، ۲۰۰۳). محققین مختلفی (Chen و Kitts، ۲۰۰۸؛ Augustin و Sanguansri، ۲۰۰۹) به خصوصیات آنتی‌اکسیدانی مواد میلارد اشاره‌کرده‌اند که این امر در راستای محافظت بهتر اسیدهای چرب در برابر اکسیداسیون در طی انجام فرایند خشک‌کردن توسط پوشش‌های میلارد در این آزمایش می‌باشد. عملکرد بسیار مناسب نمک‌های کلسیمی در حفظ کیفیت روغن از نظر اکسیداتیو در دماها و زمان‌های مختلف نگهداری، صرف‌نظر از افزودن یا نیافزودن مکمل مواد معدنی را می‌توان به کامل بودن واکنش ابتدایی تشکیل نمک، عدم وجود اسیدهای چرب آزاد باند نشده با کلسیم به میزان زیاد و عملکرد مناسب پیوند نمکی در حفظ اسیدهای چرب در این ساختار و عدم آزادسازی تدریجی در شرایط نگهداری را می‌توان از دلایل عملکرد مناسب نمک‌های کلسیمی در حفظ کیفیت اکسیداتیو روغن در مقایسه با مکمل‌های ریزپوشانی شده دانست. با این حال اطلاعات بیشتری برای مقایسه در این ارتباط وجود ندارد.

افزایش زمان قرارگیری مکمل‌ها در دماهای مختلف سبب افزایش عدد پراکسید شد. با این‌حال، افزایش دما تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر تشدید فرایند اکسیداسیون داشت. افزایش زمان نگهداری مکمل‌ها در دمای ۲۵ درجه سبب افزایش تدریجی میزان شاخصه‌های اکسیداتیو شد. افزایش سریع‌تر عدد پراکسید در مکمل‌های غیرمیلارد و نیز در مکمل‌های دارای مقادیر بالاتر روغن، علاوه بر مواردی همانند عملکرد کپسوله شدن، می‌تواند به دلیل بالاتر بودن شاخصه‌های اکسیداسیون در زمان آغاز آزمایش باشد. مکمل مواد معدنی تأثیر فزاینده بر فرآیند اکسیداسیون اولیه و ثانویه داشت. افزایش زمان نگهداری در هر دو دما سبب افزایش تأثیرگذاری مکمل مواد معدنی بر میزان اکسیداسیون مکمل‌های میلارد و غیرمیلارد شد. بالاتر بودن مقاومت اکسیداتیو در ریزکپسول‌های میلارد به دلیل بالاتر بودن عملکرد کپسوله شدن پس از نگهداری در زمان‌های مختلف و نیز به دلیل بالاتر بودن ویسکوزیته امولسیون‌های معادل آن‌ها است که در بخش قبلی به‌صورت کامل موردبحث و بررسی قرارگرفته است. در یک آزمایش دیگر Barroso و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی اثر ریزپوشانی بر خصوصیات اکسیداتیو روغن کتان با استفاده از نشاسته پرداخته و نتیجه‌گیری نمودند که ریزپوشانی در طی مراحل مختلف نگهداری در دمای اتاق در مقایسه با روغن ریزپوشانی نشده باعث کاهش میزان اکسیداسیون می‌شود.

نتیجه‌گیری

داده‌های ارائه‌شده در این پژوهش نشان‌دهنده پتانسیل مناسب استفاده از فرایند تهیه نمک‌های کلسیمی و ریزپوشانی با استفاده از خشک‌کن پاششی در تهیه مکمل‌های خوراک دام و طیور با هدف افزایش ماندگاری و کاهش فساد اکسیداتیو، جلوگیری از افت مصرف خوراک به‌واسطه کاهش بو در روغن‌های پوشش‌دار شده و افزایش سلامتی مصرف‌کننده از طریق تأمین هرچه بیشتر اسیدهای چرب غیراشباع ضروری و کاهش میزان مصرف اسیدهای چرب اشباع، ترانس و محصولات اکسیداتیو چربی‌ها است. بهترین عملکرد در ارتباط با هر دو منبع روغنی مورد آزمون، مربوط به سیستم محافظتی

با استفاده از تشکیل نمک‌های کلسیمی اسیدهای چرب بود. باوجود عملکرد مناسب سیستم ریزپوشانی در افزایش مقاومت اکسیداتیو، انتخاب مواد پوشاننده مناسب و سطوح مناسب روغن به مواد پوشاننده ازجمله موارد تأثیرگذار بر عملکرد این سیستم‌ها است. تأمین سایر مواد مغذی در کنار منابع اسیدهای چرب ضروری، یکی از مزایای استفاده از مکمل‌های ریزپوشانی شده است، با این‌حال، بالاتر بودن هزینه تولید، کاهش غلظت روغن، اسیدهای چرب و انرژی قابل متابولیسم در این مکمل‌ها در مقایسه با منابع روغنی فرآوری نشده و یا سایر روش‌های محافظتی از جمله تهیه نمک‌های کلسیمی اسیدهای چرب، در کنار عدم اطمینان از میزان آزادسازی روغن ریزپوشانی شده در محل هضم و جذب در دستگاه گوارش، ازجمله عوامل بالقوه محدودکننده کاربردی شدن استفاده از مکمل‌های ریزپوشانی شده در صنعت دام و طیور کشور است. انجام آزمایش‌های تکمیلی در شرایط درون‌تنی می‌تواند پاسخگوی بسیاری از سؤالات موجود در این زمینه باشد.

تشکر و قدردانی

بخشی از هزینه‌های این تحقیق در قالب قرارداد طرح تحقیقاتی شرکت تعاونی دانش‌بنیان کیمیا دانش الوند با دانشگاه ارومیه تأمین‌شده است. از همکاری این مجموعه در تأمین هزینه‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نماییم.

References

Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S. & Madadlou, A. (2012). Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosystems Engineering*, 111: 229-241.

Al-Hakkak, J. & Al-Hakkak, F. (2010). Functional egg white–pectin conjugates prepared by controlled Maillard reaction. *Journal of Food Engineering*, 100: 152-159.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. (17th ed.) Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C.

AOCS. 2004. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. Champaign: American Oil Chemists' Society, USA.

Augustin, M. A. & Sanguansri, P. (2009). Chapter 5 Nanostructured Materials in the Food Industry, in: Advances in Food and Nutrition Research Ed. L. T. Steve, Academic Press, 183-213.

Augustin, M.A., Sanguansri, L. & Bode, O. (2006). Maillard Reaction Products as Encapsulants for Fish Oil Powders. *Journal of Food Science*, 71: E25-E32.

Binsi, P. K., Nayak, N., Sarkar, P.C., Jeyakumari, A., Ashraf, P.M., Ninan, G. & Ravishankar, C. N. (2017). Structural and oxidative stabilization of spray dried fish oil microencapsulates with gum arabic and sage polyphenols: Characterization and release kinetics. *Food Chemistry*, 219: 158-168.

Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M.Y., Mousa, A. & Liang, L. (2016). Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15: 143-182.

Barroso, A. K. M., Pierucci, A. P. T. R., Freitas, S. P., Torres, A. G. & Miguez da Rocha-Lea˜o, M. H. (2014). Oxidative stability and sensory evaluation of microencapsulated flaxseed oil. *Journal of Microencapsulation*, 31: 193–201.

Calvo, P., Hernandez, T., Lozano, M. & Gonzalez-Gomez, D. (2010). Microencapsulation of extra-virgin olive oil by spray-drying: Influence of wall material and olive quality. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112: 852-858.

Chen, X. M. & Kitts, D. D. (2008). Antioxidant activity and chemical properties of crude and fractionated maillard reaction products derived from four sugar–amino acid maillard reaction Model systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1126: 220-224.

Chilliard, Y., Glasser, F., Ferlay, A., Bernard, L., Rouel, J. & Doreau, M. (2007). Diet, rumen biohydrogenation and nutritional quality of cow and goat milk fat. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109: 828-855.

Dickinson, E. 2009. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 23: 1473-1482.

Ganga, A., Nieto, S., Sanhuez, J., Romo, C., Speisky, H. & Valenzuela, A. (1998). Concentration and stabilization of n-3 polyunsaturated fatty acids from sardine oil. *Journal of American Oil Chemists Society*, 75: 733-736

Fievez, V., Vlaeminck, B., Jenkins, T., Enjalbert, F. & Doreau, M. (2007). Assessing rumen biohydrogenation and its manipulation *in vivo, in vitro* and *in situ*. *Europian Journal of Lipid Science and Technology*, 109: 740-756.

Hogan, S. A., McNamee, B. F., O'Riordan, E. D. & O'Sullivan, M. (2001). Microencapsulating Properties of Sodium Caseinate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49: 1934-1938.

Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y. & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Drying Technology*, 26:816–35.

Khalilvandi Behroozyar, H., Dehghan Banadaky, M., Ghaffarzadeh, M., Rezayazdi, K. & Ghaziani, F. (2013). Effects of fish oil protection on ruminal metabolism of fatty acids, *in vitro* digestibility and ruminal parameters. *Iranian Animal Science Research Journal*, 23: 123-142. (In Persian).

Khalilvandi Behroozyar H., Dehghan Banadaky, M. Ghaffarzadeh M., Rezayazdi K., Kohram H. &Asadnejad, B.(2015). Production and *in vitro* evaluation of microencapsulated fish oil: Nutritive value and biohydrogenation resistance compared with fish oil ca-salts. *Journal of Ruminant Research*, 2: 81-108. (In Persian).

Kim, Y. D., Morr, C. V. & Schenz, T. (1996). Microencapsulation properties of gum Arabic and several food proteins: Spray-dried orange oil emulsion particles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44: 1314–1320.

Kosaraju, S. L., Weerakkody, R. &Augustin, M. A. (2009). *In-vitro* evaluation of hydrocolloid-based encapsulated fish oil. *Food Hydrocolloids*, 23: 1413-1419.

Kowalski, R. 2007. GC analysis of changes in the fatty acid composition of sunflower and olive oils heated with quercetin, caffeic acid, protocatechuic acid, and butylated hydroxyanisole. *Acta Chromatography*, 18: 15-23.

Kris-Etherton, P. M., Etherton, T. D., Carlson, J. & Gardner, C. (2002). Recent discoveries in inclusive food-based approaches and dietary patterns for reduction in risk for cardiovascular disease. *Current Opinion in Lipidology*, 13: 397-407.

Licitra, G., Hernandez, T. M. & Van Soest, P. J. (1996). Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feed. *Animal Feed Science and Technology*, 57: 347-358.

Lee, M.R.F., Tweed, J.K.S., Moloney, A.P. & Scollan, N.D. (2005). The effects of fish oil supplementation on rumen metabolism and the biohydrogenation of unsaturated fatty acids in beef steers given diets containing sunflower oil. *Journal of Animal Science*, 80: 361-367.

Mashek, D. G., Bertics, S. J. & Grummer, R. R. (2005). Effects of intravenous triacylglycerol emulsions on hepatic metabolism and blood metabolites in fasted dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 88: 100-109.

McClements, D. J. (2005). Food Emulsions: Principles, practice, and techniques (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.

Miyashita, K. & Takagi, T. (1986). Study on the oxidative rate and prooxidant activity of free fatty acids. *Journal of American Oil Chemists Society*, 63: 1380.

Miyashita, K., Frankel, E. N. & Neff, W. E. (1990). Autoxidation of polyunsaturated triacylglycerols. III. Synthetic triacylglycerols containing linoleate and linolenate. *Lipids*, 25: 48.

Oliver, C. M., Melton, L. D. & Stanley, R. A. (2006). Creating proteins with novel functionality via the Maillard reaction: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46: 337-350.

Pisecky, J. 1997. Handbook of Milk Powder Manufacture. Copenhagen / Sorborg, Denmark: A/S Niro Atomizer Ltd. p. 206.

Polavarapu, S., Oliver, C. M., Ajlouni, S. & Augustin, M.A. (2011). Physicochemical characterisation and oxidative stability of fish oil and fish oil–extra virgin olive oil microencapsulated by sugar beet pectin. *Food Chemistry*, 127:1694–705.

Reynolds, C. K., Aikman, P. C., Lupoli, B., Humphries, D.J. & Beever, D.E. (2003). Splanchnic metabolism of dairy cows during the transition from late gestation through early lactation. *Journal of Dairy Science*, 86: 1201-1217.

Safari, R., Valizadeh, R., KadKhodayi, R., Alamolhoda, B. N., Tahmasebi, A. M. &Naserian, A. A. (2012). Resistance of fish oil microcapsules in rumen condition and effects on *in vitro* gas production and digestibility. *Iranian Journal of Animal Science Research*, 4: 265-273. (In Persian).

Santos, J. E. P., Bilby, T. R., Thatcher, W. W., Staples, C. R. & Silvestre, F. T. (2008). Long chain fatty acids of diet as factors influencing reproduction in cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, 43: 23-30.

SAS Institute Inc. (2002). Statistical Analysis System (SAS) User's Guide. SAS Institute. Cary. N.C. USA.

Tan, L. H., Chan, L.W. &Heng, P.W.S. (2005). Effect of oil loading on microspheres produced by spray drying. *Journal of Microencapsulation*, 22: 253-259.

Van Soest, P. J., Robertson, J. B. & Lewis, B. A. 1991. Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74: 3583-3597.

Velasco, J., Dobarganes, M. C. & Ma´rquez-Ruiz, G. (2010). Application of the accelerated test Rancimat to evaluate oxidative stability of dried microencapsulated oils. *Grasas Aceites*, 51:261–267.