Iranian Journal of Systematic Review in Medical Sciences (IJSR) Original Article

Summer 2024, Volume 2, Issue 2

Cavitation Induction Methods and Their Impact on Nutritional Values of Milk; A Scoping Review

Ehsan Seyfali [1], Mohammad Hadi Khoshtaghaza [1*], Milad Rouhi Langerodi [2], Gholamhassan Najafi [1]

1. Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Research Center of Oils and Fats, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran.

Corresponding Author: Mohammad Hadi Khoshtaghaza, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
E-mail: khoshtag@modares.ac.ir

Received: 2024/07/9 Accepted: 2024/09/8

Abstract

Introduction: With the global population increasing, coupled with rising incomes and growing health consciousness, the demand for milk and dairy products is expanding rapidly. Cavitation, has emerged as an effective technique for enhancing milk processing in the dairy industry. This review focuses on exploring different cavitation induction methods used in milk processing and analyzing their impact on the nutritional value of milk.

Methods: Using a scoping review methodology, this study collected data from both authoritative Persian databases, including SID and ISC, and international platforms like Google Scholar, Scopus, PubMed, and Web of Science. The search covered documents published between January 1, 2010, and January 1, 2024, in accordance with predefined research questions and inclusion criteria.

Results: The initial search yielded 873 documents, of which 15 met the criteria for detailed analysis. The effects of various cavitation induction methods on the nutritional content of milk were categorized into five key areas: fats, proteins, vitamins, minerals, and organoleptic characteristics.

Conclusions: Cavitation significantly reduces the time and energy needed for pasteurization and homogenization by minimizing thermal processing, thereby improving milk quality. Among the two primary cavitation methods, hydrodynamic cavitation is particularly effective at preserving milk's nutritional value and enhancing its flavor profile. As a result, it offers a promising alternative or complementary approach to conventional milk processing techniques.

Keywords: Cavitation, Milk Processing, Nutritional Value, Acoustic Cavitation, Hydrodynamic Cavitation.

نشریه مرور سیستماتیک در علوم پزشکی
مقاله پژوهشی
تابستان ۱۴۰۳، دوره ۲، شماره۲

روش های القای کاویتاسیون و تأثیر آن بر ارزش تغذیه ای شیر؛ یک مطالعه مرور میدانی

احسان سیف علی[۱]، محمدهادی خوش تقاضا [۱*]، میلاد روحی لنگرودی[۲]، غلام حسن نجفی[۱]

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲. مرکز تحقیقات روغن ها و چربی ها، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

نویسنده مسئول: محمدهادی خوش تقاضا، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
ایمیل: khoshtag@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۸

چکیده

مقدمه: با توجه به رشد جمعیت، افزایش درآمد و آگاهی سلامت، تقاضای جهانی بالایی برای مصرف شیر و فرآورده های آن وجود دارد. کاویتاسیون روش مؤثری برای فرآوری شیر است. در صنایع لبنی، برای القای کاویتاسیون از روش های آکوستیک و هیدرودینامیک استفاده می شود. پژوهش حاضر با هدف مروری بر روش های مختلف القای کاویتاسیون در فرآوری شیر و ارزش تغذیه ای آن انجام شد.

روش کار: مطالعه حاضر از نوع مرور میدانی بود. برای جمع آوری اطلاعات، پایگاه های معتبر فارسی شامل SID، ISC و پایگاه های اطلاعاتی بین المللی شامل Google Scholar، Scopus، PubMed و Web of Science در بازه زمانی ۲۰۱۰/۱/۱ تا ۲۰۲۴/۱/۱ با توجه به سوال اصلی پژوهش و معیارهای ورود، مورد جستجو قرار گرفت.

یافته ها: در جستجوی اولیه ۸۷۳ سند به دست آمد که در نهایت ۱۵ سند مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفت. تأثیر روش های مختلف القای کاویتاسیون بر ارزش تغذیه ای شیر در پنج طبقه (چربی ها، پروتئین ها، ویتامین ها، املاح معدنی و خواص ارگانولپتیک) دسته بندی شد.

نتیجه گیری: پدیده کاویتاسیون با به حداقل رساندن فرآیندهای حرارتی، موجب کاهش زمان و توان مصرفی برای پاستوریزاسیون، هموژنیزاسیون و افزایش کیفیت شیر می گردد. از بین دو روش القای کاویتاسیون، روش هیدرودینامیک به دلیل حفظ ارزش تغذیه ای شیر و بهبود طعم آن، از اهمیت بسزایی برخوردار است و می تواند به عنوان یک روش جایگزین یا مکمل برای فرآوری شیر مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: کاویتاسیون، فرآوری شیر، ارزش تغذیه ای، کاویتاسیون آکوستیک، کاویتاسیون هیدرودینامیک.

مقدمه

پیشرفت های اخیر در علوم و صنایع غذایی منجر به تولید محصولات با کیفیت و تازه شده است (۱). بدین منظور تولید کنندگان تلاش می کنند که با کیفیت ترین محصولات را با فرآیندهای ساده تر، در مدت زمان کوتاه تر و با هزینه کمتر تولید نمایند (۲). شیر و فرآورده های آن یکی از مهمترین گروه های تغذیه ای انسان است که سرشار از مواد مغذی و ارتقا دهنده سلامت است (۳). این گروه غذایی حاوی درشت و ریز مغذی ها مانند کربوهیدارت ها، اسیدهای چرب، پروتئین ها، ویتامین ها، مواد معدنی و همچنین مواد فعال زیستی مانند پروبیوتیک ها می باشد (۴). با توجه به رشد جمعیت، افزایش درآمد و آگاهی سلامت، تقاضای جهانی بالایی برای مصرف شیر و فرآورده های آن وجود دارد. از آنجا که شیر توسط بسیاری از افراد به صورت روزانه مصرف می شود، حفظ و ارتقاء خصوصیات تغذیه ای و ارگانولپتیکی آن بسیار مهم است (۵). در حال حاضر برای فرآوری شیر و محصولات لبنی ایمن و با کیفیت از روش های حرارتی مختلفی مانند فرآوری کوتاه مدت با دمای بالا (HTST) و فرآوری با دمای خیلی بالا (UHT) استفاده می شود. روش های حرارتی مصرف بی خطر شیر را تضمین

می کنند؛ اما این روش ها با مصرف بالای انرژی همراه هستند و ترکیبات تغذیه ای و خصوصیات ارگانولپتیک شیر را تغییر می دهند (۳, ۵, ۶). بسیاری از ترکیبات بیولوژیکی و مفید در شیر حساس به گرما هستند که پاستوریزاسیون حرارتی می‌تواند باعث کاهش قابلیت جذب و فعالیت آن‌ها شود. به عنوان مثال، پاستوریزاسیون حرارتی منجر به از دست دادن فعالیت ایمنی ایمونوگلوبولین‌ها در ۷۳ درجه سلسیوس می شود. همچنین ویتامین‌هایی مانند تیامین، ریبوفلاوین، رتینول یا توکوفرول نیز به گرما حساس هستند. علاوه بر این، فرآیند حرارتی می تواند منجر به تشکیل اسیدهای چرب ترانس و تولید مواد با وزن مولکولی پایین، مانند آلدهیدها، کتون‌ها و لاکتون‌ها شود که باعث بو و طعم نامطبوع در شیر می شود (۵, ۷). بنابراین برای برآورده نمودن تقاضای رو به رشد محصولات لبنی با کیفیت تر، محققان تلاش هایی در جهت تغییر در فرآوری شیر و روش های حرارت دهی معمول به منظور بهبود کیفیت محصول و بهینه سازی اقتصادی انجام داده اند. اخیرا مشخص شده است که کاویتاسیون روش مؤثری برای فرآوری شیر و سایر غذاهای مایع است (۳, ۸). کاویتاسیون پدیده‌ای مرکب از تشکیل، رشد و فروپاشی میکروحباب‌ها به دلیل تغییر فشار سریع در یک مایع می‌باشد که در فواصل زمانی کوتاه رخ می‌دهد. در این پدیده، انرژی مکانیکی و شیمیایی ناشی از فروپاشی حباب ها در محیط مایع منجر به اثرات مخربی بر میکروارگانیسم های مختلف می شود (۹). با توجه به مؤثر بودن این پدیده در از بین بردن و یا غیرفعال کردن میکروارگانیسم های بیماری زا، در مطالعات مختلفی به کاربرد این روش در صنایع غذایی از جمله شیر و لبنیات پرداخته شده است. برخی از مطالعات نشان داده اند که کاویتاسیون در مقایسه با فرآیندهای حرارتی مرسوم، می تواند خواص تغذیه ای مایعات غذایی مختلف را بهبود بخشد و موجب حفظ ترکیبات فعال زیستی گردد (۲, ۳, ۷, ۸). به طور کلی، اثرات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی کاویتاسیون به روش القای کاویتاسیون بستگی دارد (۱۰). در صنایع لبنی، دو نوع روش برای القای کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است. این روش ها عبارتند از: کاویتاسیون هیدرودینامیک و کاویتاسیون آکوستیک (۲). اصول حاکم بر تشکیل حباب در این دو نوع کاویتاسیون یکسان است و تفاوت آنها در مکانیسمی است که باعث کاهش فشار موضعی می شود (۳, ۹). در کاویتاسیون هیدرودینامیک تغییر فشار در مایع ناشی از تغییر سرعت، موجب شکل گیری حباب های کاویتاسیون می شود و در کاویتاسیون آکوستیک تغییر فشار در مایع با عبور امواج اولتراسوند از آن ایجاد می شود (۹). ارزیابی اثربخشی این روش ها، نقش تعیین کننده ای در حفظ ارزش بیولوژیکی شیر در صنایع لبنی دارد (۶). از آنجا که بررسی ارزش تغذیه ای شیر فرآوری شده با استفاده از پدیده کاویتاسیون، یک هدف مهم برای تولید محصولات با کیفیت است؛ بنابراین پژوهش حاضر با هدف مروری بر روش های مختلف القای کاویتاسیون در فرآوری شیر و ارزش تغذیه ای آن انجام شد.

روش کار

این مطالعه از نوع مرور میدانی براساس رویکرد پیشنهادی آرکسی و اومالی انجام شد (۱۱). این رویکرد مشتمل بر پنج مرحله شامل طراحی سوال پژوهش، جستجو و استخراج مطالعات مرتبط، انتخاب مطالعات، خلاصه کردن اطلاعات و گزارش یافته ها است (۱۱,۱۲).

- سوال پژوهش:

روش های مختلف القای کاویتاسیون در فرآوری شیر چه تاثیری بر خواص تغذیه ای آن دارد؟

- جستجو و استخراج مطالعات مرتبط

در این مرحله، دو نفر از اعضای تیم پژوهش به صورت مستقل به جستجوی متون مرتبط با روش های مختلف القای کاویتاسیون در فرآوری شیر و ارزش تغذیه ای آن پرداختند. برای یافتن اسناد مرتبط، پایگاههای اطلاعاتی معتبر فارسی شامل پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی و پایگاه استنادی علوم جهان اسلام و پایگاههای اطلاعاتی بین المللی شامل پابمد، اسکوپوس، گوگل اسکالر و وب آف ساینس مورد جستجو قرار گرفت. علاوه بر این، برای جستجوی متون خاکستری، منابع کتابخانه ای و وب سایت های سازمان های بهداشت مواد غذایی و شبکه جهانی وب از طریق موتور جستجوی گوگل مورد بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از شناسایی و بررسی همهٔ اسناد موجود، لیست منابع اسناد انتخاب شده نیز به صورت دستی جستجو شد. جستجوی متون بر اساس معیارهای ورود انجام شد. معیارهای ورود به این پژوهش شامل دسترسی رایگان به مطالعات، تشریح روش های مختلف القای کاویتاسیون در فرآوری شیر و ارزش تغذیه ای آن، انتشار به زبان فارسی یا انگلیسی در محدوده زمانی ۲۰۱۰/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۴/۰۱/۰۱

بـود. اسـنادی کـه بـه سـایر روش هـای فـرآوری شـیر پرداختـه بودنـد، وارد مطالعـه نشـدند. واژه هـای مورد جسـتجوی مسـتخرج از سـرعنوان هـای موضوعـی پزشـکی شـامل «کاویتاسـیون»، «هیدرودینامیـک»، «آکوسـتیک»، «اولتراسـوند»، «شـیر»، «فـرآوری»، «ریزمغـذی»، بـود. بـرای جسـتجو از عملگرهـای بولیـن (و، یـا) اسـتفاده شـد.

- انتخاب مطالعات

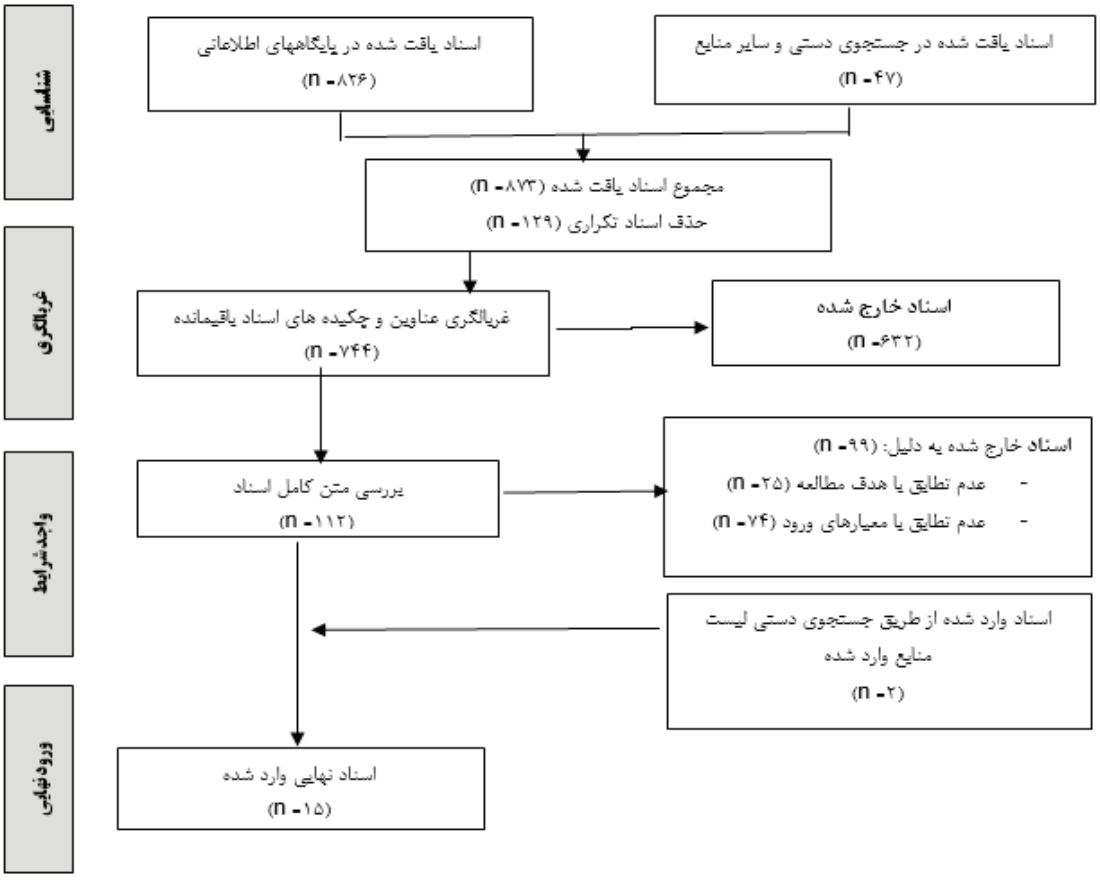
غربالگـری و انتخـاب اسـناد بـر اسـاس دسـتورالعمل مـوارد ترجیحـی درگـزارش مقـالات مـروری منظـم و فراتحلیـل هـا (پریزمـا) صـورت گرفـت (۱۳). در ایـن مرحلـه، بعـد از حـذف اسـناد تکـراری، دو نفـر از اعضـای تیـم پژوهـش بـه صـورت مسـتقل کلیـه عناویـن، چکیـده هـا یـا اسـنادی را کـه از طریـق جسـتجو بـر اسـاس معیارهای ورود مشـخص شـده بودند، بررسـی نمودنـد. در مـواردی کـه بـرای انتخـاب اسـناد مرتبـط ابهـام وجود داشـت، متـن کامـل سـند مـورد بررسـی قـرار گرفـت. در صـورت وجـود تضـاد بیـن نفـر اول و دوم از اعضـای تیـم پژوهـش، بحـث و مشـورت بـا نفـر سـوم انجـام شـد.

-خلاصه کردن اطلاعات

در ایـن مرحلـه، دو نفـر از اعضـای تیـم پژوهـش بـه طـور مسـتقل اطلاعـات مربـوط بـه هـر یـک از اسـناد انتخـاب شـده را بررسـی نمـوده و در فـرم جمـع آوری داده هـا وارد نمودنـد. فـرم جمـع آوری داده هـا حـاوی اطلاعاتـی از قبیـل نـام نویسـندگان، سـال انتشـار و تشـریح روش هـای مختلـف القـای کاویتاسـیون در فـرآوری شـیر و ارزش تغذیـه ای آن بـود. هرگونـه اختـلاف در مـورد اطلاعـات جمـع آوری شـده از طریـق بحـث و گفتگـو بیـن اعضـای تیـم برطـرف شـد.

یافته ها

درجسـتجوی اولیـه ۸۷۳ سـند بدسـت آمـد. بعـد از بررسـی عناویـن و چکیـده هـا ۷۶۱ سـند بـه دلیـل تکـرار و عـدم ارتبـاط بـا هـدف پژوهـش حـذف شـد. بعـد از بررسـی متـن کامـل اسـناد باقـی مانـده بـر اسـاس معیارهـای ورود، ۹۹ سـند بـه دلیـل عـدم تطابـق بـا هـدف مطالعـه و معیارهـای ورود حذف شـد و ۱۵ سـند وارد مطالعـه شـد (شـکل ۱).



شکل ۱. دیاگرام اسناد وارد شده به مطالعه براساس PRISMA

اسناد وارد شده به مطالعه به زبان انگلیسی (چهارده سند) و فارسی (یک سند) بود. روش القای کاویتاسیون در اسناد وارد شده به مطالعه از نوع آکوستیک (هشت سند)، هیدرودینامیک (چهار سند) و ترکیبی از هر دوی آنها (سه سند) بود. در پایان این مرحله، تأثیر روش های مختلف القای کاویتاسیون بر چربی ها، پروتئین ها، ویتامین ها، املاح معدنی و خواص ارگانولپتیک شیر دسته بندی شد. نتایج این مطالعات به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱. دسته بندی نتایج القای کاویتاسیون به روش آکوستیک و هیدرودینامیک بر ارزش تغذیه ای شیر

خواص تغذیه ای شیر	نوع کاویتاسیون	خلاصه نتایج مطالعات
چربی ها	آکوستیک	کاهش اندازه گلبول های چربی و افزایش تعداد آنها (۱۴–۱۸)، افزایش ماندگاری شیر(۱۹)، آزاد شدن تری گلسیرول و افزایش اسیدهای چرب آزاد (۱۵)، افزایش کارایی هموژنیزاسیون (۶,۲۰–۲۲)، افزایش اکسایش چربی شیر با افزایش دما و زمان فرآیند، کاهش اندیس پراکسید و اسید تیوباربیتوریک، تولید پراکسیدها، الکل ها، آلدئیدها و کتونها (۵)
	هیدرودینامیک	کاهش اندازه گلبولهای چربی و افزایش تعداد آنها، افزایش ماندگاری شیر (۱۹)، پراکندگی ذرات چربی با ابعاد یکنواخت (۲۰, ۲۲)، افزایش رادیکالهای هیدروکسیل با افزایش شدت کاویتاسیون، اکسیداسیون پروتئین‌های غشای گلبولهای چربی (۳)، کاهش اندازه گلبولهای چربی بر اساس حجم (۲۳)
پروتئین ها	آکوستیک	دناتوره شدن پروتئین‌های شیر، کاهش اندازه و پایداری میسل کازئین (۱۸, ۲۴,۲۵)، عدم تاثیر بر اندازه میسلهای کازئین (۲۶)
	هیدرودینامیک	عدم تغییر در آنتالپی دناتوراسیون (۲۳)، آسیب پروتئینها مشابه فرآیند پاستوریزاسیون معمولی (۳)، عدم تغییر در محتوای پروتئین (۲۷)
ویتامین ها	آکوستیک	کاهش ویتامین های B_1، B_2 (۵) و E (۵, ۱۴)، عدم تغییر میزان ویتامین A (۱۴)
	هیدرودینامیک	محتوای ویتامین های A، B_2، B_{12} و C مشابه فرآیند پاستوریزاسیون معمولی (۳)
املاح معدنی	آکوستیک	حفظ کلسیم (۲۸)
	هیدرودینامیک	حفظ املاح معدنی کلسیم، فسفر، منیزیم، پتاسیم و زینک (۳)
خواص ارگانولپتیک	آکوستیک	ایجاد ترکیبات طعمی نامطلوب، تولید ترکیبات فرار مانند اسید دودکانوئیک و اسید اکتانوئیک و طعم فلزی، سوخته و لاستیکی (۱۴,۱۵,۲۲, ۲۹)، ایجاد رنگ بهتر با شدتهای بالاتر (۱۶)
	هیدرودینامیک	عدم تغییر نسبت به شیر خام (۲۳)، طعم مطلوب (۲۲)، رنگ بهتر (۲۰)

بحث

این مطالعه با هدف مروری بر روش های مختلف القای کاویتاسیون در فرآوری شیر و ارزش تغذیه ای آن انجام شد. فشار بالای ایجاد شده در اثر کاویتاسیون باعث ایجاد تغییراتی در ساختار برخی از اجزای شیر می شود. یکی از این تغییرات ساختمانی، شکسته شدن غشای گلبول های چربی شیر است که منجر به آزاد سازی تری گلیسرول و سایر لیپیدها مانند کلسترول و فسفولیپیدها می شود. با هیدرولیز گلیسرول محتوای اسیدهای چرب آزاد افزایش می یابد (۱۵). در طی فرایند کاویتاسیون آکوستیک و هیدرودینامیک، اندازه گلبول های چربی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد و تعداد گلبول ها را چند برابر می کند (۱۴–۱۹). یافته های یک مطالعه (۱۹) نشان داد که با افزایش زمان و شدت کاویتاسیون آکوستیک و هیدرودینامیک، تعداد کل گلبول های چربی افزایش یافت و قطر و اندازه آن ها کاهش یافت. علاوه بر این، مدت زمان ماندگاری شیر تا ۱۲ روز افزایش یافت. در مطالعه دیگری نیز در طی فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک، اندازه متوسط گلبول های چربی شیر بر اساس حجم کاهش یافت (۲۳). کاهش اندازه گلبول های چربی را می توان به فشار بالا، نیروی برشی و دمای شیر در هنگام فروپاشی حباب نسبت داد. به عبارت دیگر، تنش های برشی در طی کاویتاسیون باعث کاهش اندازه ذرات چربی در ابعاد نانو با پراکندگی یکنواخت می شود (۲۲,۳۰). چربی شیر تمایل زیادی به جدا شدن از شیر و تشکیل گویچه های بزرگتر دارد. گویچه های طبیعی چربی شیر طی فرآیند هموژنیزاسیون یا همگن سازی متلاشی می شوند و سطح چربی افزایش می یابد. در صنعت لبنیات طی این فرآیند، چربی شیر به طور مکانیکی خرد می شود و به اجزای ریز و کوچک تبدیل می شود. پدیده کاویتاسیون، کارایی هموژنیزاسیون را افزایش می دهد (۶,۲۰–۲۲). در یک مطالعه مشخص شد که کاویتاسیون آکوستیک، می‌تواند برای تولید گلبول‌های چربی–کمپلکس‌های پروتئین شیر

بسیار کاربردی و مؤثر باشد و با هموژنیزاسیون معمولی متفاوت است و از کیفیت بالاتری برخوردار است (۲۱). مطالعه دیگری نیز نشان داد که فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک علاوه بر پاستوریزاسیون، موجب کاهش اندازه گلبول های چربی با حداقل تغییرات در کیفیت شیر می‌شود (۲۳). از نظر علم تغذیه، هموژنیزاسیون منجر به جذب بهتر چربی شیر در بدن می شود که این امر به ویژه برای غذای کودک اهمیت دارد.

اثرات مکانیکی و حرارتی کاویتاسیون می‌تواند موجب اکسیداسیون پروتئین‌های غشای گلبول های چربی و ایجاد ترکیبات طعمی نامطلوب شود (۳). اکسیداسیون چربی شیر تحت تاثیر فاکتورهای زیادی از جمله حرارت، نور، تابش، رطوبت و PH می باشد. در طی فرآیند آسیب سلولی در حین کاویتاسیون، اکسیژن فعال و رادیکال های آزاد تغییر دهنده مولکول های زیستی، موجب تولید پراکسیدها، الکل ها، آلدئیدها و کتون ها می شوند (۵, ۳۱). در مطالعه رضوی و همکاران (۵) تاثیر فرآیند کاویتاسیون به روش آکوستیک بر اکسیداسیون چربی شیر با استفاده از شاخص های پراکسید و اسید تیوباربیتوریک ارزیابی شد. در این مطالعه با افزایش دما و زمان کاویتاسیون آکوستیک اکسایش چربی شیر افزایش یافت و نمونه شیر فرآوری شده با کاویتاسیون آکوستیک، کمترین اندیس پراکسید و اندیس تیوباربیتوریک را داشت. مطالعات مختلف نشان می دهند که با افزایش شدت کاویتاسیون به روش آکوستیک رادیکال های هیدروکسیل تولید شده افزایش می یابند (۵, ۳۲). میزان رادیکال های آزاد تولید شده در کاویتاسیون به شدت فروپاشی حباب های تولید شده در شیر بستگی دارد که تحت تاثیر زمان و شدت کاویتاسیون است. رادیکال های آزاد به طور مستقیم بر اکسایش چربی تأثیر می گذارند. افزایش زمان کاویتاسیون و حضور حباب های هوا و ذرات جامد شیر مانند چربی ها و پروتئین ها منجر به ایجاد هسته هایی برای رادیکال های آزاد و تشدید فرآیند اکسایش می شود (۵). علاوه بر این، بسته به فرکانس کاویتاسیون آکوستیک، اثرات فیزیکی و شیمیایی مختلفی در شیر ایجاد می شود. اثرات فیزیکی و مکانیکی کاویتاسیون باعث ایجاد نیروهای برشی شدید، امواج ضربه‌ای و متلاطم می‌شود، در حالی که اثرات شیمیایی کاویتاسیون منجر به زنجیره‌ای از واکنش‌های شیمیایی، یعنی واکنش‌های ردوکس لیپیدها یا پروتئین‌ها، در نواحی سطحی بین حباب‌های گاز در حال فروپاشی و فاز مایع اطراف آن می گردد (۳۳). به طور مثال کاویتاسیون آکوستیک در محدوده فرکانس پایین (kHz 20-100)، نیروهای فیزیکی قوی و رادیکال های فعال کمتری را تولید می کند. کاویتاسیون آکوستیک در فرکانس های بالا (kHz 300-500) اثرات فیزیکی ضعیف تری دارد؛ اما رادیکال های فعال بیشتری را تولید می کند. در مطالعات مختلف مشخص شده است که فرکانس در محدوده kHz 400-300 منجر به واکنش های شیمیایی بهینه با بالاترین نرخ تشکیل رادیکال های هیدروکسیل می شود (۳۲-۳۴). در فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک، نیروهای برشی ایجاد شده توسط کاویتاسیون همراه با نقاط حرارتی موضعی در مایع، منجر به پاستوریزاسیون همزمان و کاهش اندازه گلبول های چربی شیر، با حداقل تغییرات در خواص فیزیکی و عملکردی شیر می‌شود.

پروتئین های شیر حاوی ۸۰ درصد کازئین و ۲۰ درصد پروتئین آب پنیر هستند که تحت تأثیر کاویتاسیون قرار می گیرند (۳۳). اثرات کاویتاسیون آکوستیک بر روی میسل های کازئین نتایج متفاوتی داشته است. در برخی از پژوهش ها اندازه و پایداری میسل کازئین در فرآیند کاویتاسیون آکوستیک کاهش یافته است (۱۸,۲۴,۲۵)؛ اما نتایج برخی دیگر از پژوهش ها نیز نشان دهنده عدم تأثیر کاویتاسیون آکوستیک بر اندازه میسل های کازئین بوده است (۲۶). یافته‌های مطالعات مختلف نشان می دهد که نیروهای مکانیکی ناشی از کاویتاسیون آکوستیک در محدوده kHz 20 می توانند از طریق فعل و انفعالات آبگریز و پیوندهای دی سولفیدی، منجر به دناتوره شدن پروتئین‌های شیر شود (۲۱,۲۴,۲۸,۳۳). برخی مطالعات نشان داده اند که کاویتاسیون هیدرودینامیک با وجود کاهش ویسکوزیته، تغییر قابل توجهی در آنتالپی دناتوراسیون ایجاد نمی کند و این اثر در طی مدت زمان ذخیره سازی شیر بدون تغییر باقی می ماند (۲۳). نتایج یک مطالعه نشان داد که طی فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک، تغییری در محتوای ظاهری پروتئین ایجاد نمی شود (۲۷). در مطالعه دیگری نیز مشخص شد که میزان آسیب دیدن پروتئین ها در فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک مشابه فرآیند حرارت دهی معمولی در پاستوریزاسیون است (۳). دناتوره شدن پروتئین ها در طول فرآیند حرارت دهی اجتناب ناپذیر است. اغلب پروتئین های شیر و ایمونوگلوبولین ها در دمای ۶۰ درجه سلسیوس یا بالاتر دناتوره می شوند. به طور کلی، در طول

فرآیندهای حرارت دهی بسته به زمان و دمای فرآیند، ۲۰ تا ۶۰ درصد از پروتئین های شیر دناتوره می شوند (۲۷). در فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک، میزان آسیب پروتئین ها مشابه فرآیند پاستوریزاسیون معمولی است و تغییری در محتوای پروتئین ایجاد نمی شود، بنابراین استفاده از این روش در حفظ ارزش تغذیه ای شیر از اهمیت بیشتری برخوردار است.

شیر منبع غنی از ویتامین های مختلف است که نقش حیاتی در واکنش های متابولیسمی و سایر عملکردهای بدن بر عهده دارند. مهمترین ویتامین های موجود در شیر عبارتند از: ویتامین A (رتینول)، ویتامین B1 (تیامین)، ویتامین B2 (ریبوفلاوین)، ویتامین B6 (پیریدوکسین)، ویتامین B12 (کوبالامین)، ویتامین C (اسکوربیک اسید) و ویتامین E (توکوفرول) (۳۵-۳۷). در مطالعات مختلف ویتامین های محلول در آب و محلول در چربی شیر مانند توکوفرول، رتینول، ریبوفلاوین و تیامین مورد بررسی قرار گرفته اند. یافته های مطالعه رضوی و همکاران (۵) کاهش مقدار ویتامین های B1، B2 و E در فرآیند کاویتاسیون آکوستیک را نشان داد. در مطالعه دیگری نیز غلظت ویتامین A شیر تحت تأثیر اولتراسوند قرار نگرفت، در حالی که سطوح ویتامین E با افزایش شدت کاویتاسیون آکوستیک کاهش یافت (۱۴). در یک پژوهش در طی فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک محتوای ویتامین های A، B2، B12 و C به ترتیب به میزان ۲۰/۷۴ درصد، ۹/۶۷ درصد، ۲۰/۳۴ درصد و ۱۲/۹ درصد کاهش یافت که شبیه به فرآیند پاستوریزاسیون معمولی بود (۳). دلیل این امر ممکن است به اثرات شیمیایی حباب های کاویتاسیون و تولید رادیکال های آزاد مرتبط باشد، زیرا موجب آسیب پذیری برخی از ویتامین ها در برابر این عوامل می شود.

شیر منبع مهمی از املاح معدنی مانند کلسیم، فسفر، منیزیم، روی و پتاسیم است که برای رشد، سنتز پروتئین، انقباض عضلات، عملکرد عصبی و حفظ تعادل مایعات بدن انسان ضروری است (۳,۳۸). مطالعات نشان داده اند که در طی فرآیند پاستوریزاسیون حرارتی معمول، حدود ده درصد از املاح معدنی شیر کاهش می یابد (۳,۳۹). در یک پژوهش مشخص شد که محتوای کلسیم، فسفر، منیزیم، پتاسیم و زینک در طی فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک مشابه محتوای این املاح در شیر خام است (۳). در پژوهش دیگری نیز مشخص شد که کاویتاسیون آکوستیک در شیر غنی شده با کلسیم، به حفظ محتوای کلسیم کمک می کند (۲۸). به طور کلی، اگر املاح معدنی مانند کلسیم و فسفر در طول فرآیند کاویتاسیون به اشکال نامحلول تبدیل شوند، محتوای کل این املاح بدون تغییر باقی می ماند، زیرا این محتویات نامحلول می توانند در طی ۲۴ تا ۴۸ ساعت (در زمان ذخیره سازی شیر در دمای یخچال) به صورت محلول درآیند؛ در نتیجه محتوای مواد معدنی به سطح اولیه باز می گردد و املاح معدنی شیر حفظ می شود.

خواص ارگانولپتیک شیر از جمله رنگ، بو و طعم شیر در طی فرآیندهای پاستوریزاسیون حرارتی معمولی و کاویتاسیون تغییر می کنند (۴۰). رنگ یک ویژگی بسیار مهم برای فروش شیر است که به پراکندگی گلبول های چربی و میسل های کازئین مربوط می شود (۲۰). حرارت دادن شیر در طی فرآیند پاستوریزاسیون معمولی موجب قهوه ای شدن شیر می شود (۴۰). مطالعات مختلف نشان داده اند که کاویتاسیون از طریق بهبود هموژنیزاسیون منجر به بهبود رنگ شیر می شود، زیرا در طی فرآیند کاویتاسیون به دلیل کاهش اندازه گلبول های چربی و دناتوره شدن پروتئین ها، بازتاب نور به خوبی انجام می شود (۱۶,۲۰). علاوه بر این، رادیکال های آزاد تولید شده در طی فرآیند کاویتاسیون بر تغییر رنگ اثرگذار هستند و از تولید رنگدانه های قهوه ای جلوگیری می کنند و شیر سفیدتر به نظر می رسد. (۲۰). طعم شیر در اثر وجود لاکتوز، کمی شیرین است. در طی فرآیندهای پاستوریزاسیون حرارتی معمول طعم شیر تغییر می کند. فرآیندهای حرارتی می توانند با تشکیل لاکتون یا متیل کتون به طعم شیر آسیب برسانند (۳). در طی فرآیند کاویتاسیون آکوستیک و آسیب غشای گلبول های چربی، ترکیبات فرار مانند اسید دودکانوئیک و اسید اکتانوئیک تولید می شود. این ترکیبات موجب بو و طعم های فلزی، سوخته و لاستیکی در شیر می شود (۱۵). یافته های یک مطالعه نشان داد که شیر فرآیند شده با کاویتاسیون آکوستیک دارای طعم فلز مانند بود؛ در حالی که شیر فرآیند شده با کاویتاسیون هیدودینامیک از طعم بهتری برخوردار بود (۲۲). دلیل این امر ممکن است به مکانیسم القای کاویتاسیون مرتبط باشد. کاویتاسیون آکوستیک (به ویژه در شدت های بالا) در مقایسه با کاویتاسیون هیدرودینامیک دارای اثرات شیمیایی بیشتری است و در نتیجه تولید مواد فرار مؤثر بر طعم و بوی شیر در این روش بیشتر است.

محدودیت ها:

از محدودیت های این مطالعه، عدم دسترسی به برخی از پایگاه های داده ای و متن کامل برخی از اسناد بود. همچنین تمرکز بر روی اسناد منتشر شده به زبان فارسی و انگلیسی، یکی دیگر از محدودیت های این مطالعه بود.

نتیجه گیری

پدیده کاویتاسیون با فروپاشی حباب ها، موجب بالا رفتن دما و فشار در محیط مایع می شود و بر ساختار مواد تغذیه ای شیر تأثیر می گذارد. علاوه بر این، با به حداقل رساندن فرآیندهای حرارتی، موجب کاهش زمان و توان مصرفی برای پاستوریزاسیون و هموژنیزاسیون و افزایش کیفیت شیر می گردد. تنش های برشی در طی کاویتاسیون باعث کاهش اندازه ذرات چربی در ابعاد نانو با پراکندگی یکنواخت می شود و کارایی هموژنیزاسیون را افزایش می دهد. نیروهای مکانیکی کاویتاسیون آکوستیک موجب دناتوره شدن پروتئین های شیر می شود، اما در کاویتاسیون هیدرودینامیک، تغییر قابل توجهی در آنتالپی دناتوراسیون ایجاد نمی شود. در فرآیند کاویتاسیون همانند فرآیندهای حرارتی در پاستوریزاسیون معمولی، میزان ویتامین های شیر کاهش می یابد؛ اما در حفظ مواد معدنی، بهتر از فرآیندهای حرارتی عمل می کند. کاویتاسیون هیدرودینامیک به دلیل حفظ ارزش تغذیه ای شیر و عدم تغییر طعم، از اهمیت بسزایی برخوردار است و می تواند به عنوان یک روش جایگزین یا مکمل برای فرآوری شیر مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تلاش های روزافزون برای افزایش کیفیت مواد غذایی، کاربرد روش های مختلف کاویتاسیون برای فرآوری صنعتی شیر و محصولات لبنی دور از انتظار نخواهد بود.

سپاسگزاری

این تحقیق بخشی از رساله دانشجویی دانشگاه تربیت مدرس (کد طرح: ۲۶۵۳) است. بدینوسیله از کلیه نویسندگان مقالاتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، تقدیر و تشکر می گردد.

تضاد منافع

در این مقاله هیچ گونه تضاد منافعی گزارش نشده است.

References

1. Soria AC, Villamiel M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review, Trends Food Sci. Technol. 2010. 21: 323-331. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.003
2. Sutariya S, Sunkesula V, Kumar R, Shah K. Emerging applications of ultrasonication and cavitation in dairy industry: a review. Cogent Food & Agriculture, 2018, 4: 1549187. https://doi.org/10.1080/23311932.2018.1549187
3. Sun X, Xuan X, Ji L, Chen S, Liu J, Zhao S, Park S, Yoon JY, Om AS. A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. Ultrason Sonochem. 2021; 71: 105382. . https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382
4. Hess JM, Jonnalagadda SS, Slavin JL, Dairy foods: current evidence of their effects on bone, cardiometabolic, cognitive, and digestive health, Comprehens. Rev. Food Sci. Food Safety. 2016,15 (2): 251-268, https://doi.org/10.1111/1541-4337.12183
5. 5- Razavi R, Esmaeilzadeh Kamari R. Comparative effect of thermo sonication and conventional heat process on lipid oxidation, vitamins and microbial count of milk. Journal of Food Researches. 2020, 30 (1):167-182.
6. Krasulya O, Kanina K, Zhizhin N, Shlenskaya N, Demid A. Studying the Influence of Acoustic Cavitation and Avalanche-Streamer Discharge on the Quality of Raw Milk in Order to Achieve the Pasteurization Effect. Biological Resources Development and Environmental Management. International applied research conference. 2020. https://doi.org/10.18502/kls.v5i1.6127
7. Soni A, Samuelsson LM, Loveday SM, Gupta TB. Applications of novel processing technologies to enhance the safety and bioactivity of milk. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2021;20(5):4652-4677. . https://doi.org/10.1111/1541-4337.12819
8. Monteiro SHMC, Silva EK, Alvarenga VO, Moraes J, Freitas MQ, Silva MC, Raices, A.S. Sant'Ana SRL, Meireles MMA, Cruz AG. Effects of ultrasound energy density on the non-thermal pasteurization of chocolate milk beverage, Ultrason. Sonochem. 2018; 42: 1-10, https: //doi.org/10.1016/j. ultsonch.2017.11.015. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.015
9. Zupanc M, Pandur Ž, Stepišnik Perdih T, Stopar

D, Petkovšek M, Dular M. Effects of cavitation on different microorganisms: The current understanding of the mechanisms taking place behind the phenomenon. A review and proposals for further research. Ultrason Sonochem. 2019; 57:147-165. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.009

10. Mohammadi V, Ghasemi-Varnamkhasti M, Ebrahimi R, Abbasvali M. Ultrasonic Techniques for the Milk Production Industry. Measurement. 2014. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.022
11. Arksey H, O'Malley L. Scoping studies: towards a methodological framework. Int J Soc Res Methodol. 2005;8(1):19-32. https://doi.org/10.1080/1364557032000119616
12. Tricco AC, Lillie E, Zarin W, O'Brien K, Colquhoun H, Kastner M, et al. A scoping review on the conduct and reporting of scoping reviews. BMC Med Res Methodol. 2016; 16: 15. https://doi.org/10.1186/s12874-016-0116-4
13. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. PLoS Med. 2009;6(7):264-9. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007
14. Marchesini G, Balzan S, Montemurro F, Fasolato L, Andrighetto I, Segato S. Effect of ultrasound alone or ultrasound coupled with CO2 on the chemical composition, cheese-making properties and sensory traits of raw milk. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2012; 16, 391-397. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.09.003
15. Marchesini G, Fasolato L, Novelli E, Balzan S, Contiero B, Montemurro F. Ultrasonic inactivation of microorganisms: A compromise between lethal capacity and sensory quality of milk. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2015; 29, 215-221. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.015
16. Scudino H, Silva EK, Gomes A, Guimarães J, Cunha R, Sant'Ana A, Meireles M A. Ultrasound stabilization of raw milk: Microbial and enzymatic inactivation, physicochemical properties and kinetic stability. Ultrasonics Sonochemistry. 2020; 67. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105185
17. Porova N, Botvinnikova V, Krasulya O, Cherepanov P, Potoroko I. Effect of ultrasonic treatment on heavy metal decontamination in milk. Ultrason Sonochem. 2014;21(6):2107-11. dhttps://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.029
18. Liu Z, Juliano P, Williams R, Niere J and Augustin MA. Ultrasound improves the renneting properties of milk. Ultrasonics Sonochemistry. 2014; 21: 2131-2137. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.034
19. Pegu K, Arya SS. Comparative assessment of HTST, hydrodynamic cavitation and ultrasonication on physico-chemical properties, microstructure, microbial and enzyme inactivation of raw milk. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2021; 69: 102640. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102640
20. Li K, Woo MW, Patel H, Metzger L, Selomulya C. Improvement of rheological and functional properties of Milk Protein Concentrate by hydrodynamic cavitation. Journal of Food Engineering. 2017, https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005
21. Nguyen HA, Skelte Anema G. Ultrasonication of reconstituted whole milk and its effect on acid gelation. Food Chemistry. 2017; 217:593-601. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.117
22. Crudo D, Bosco V, Cavaglià G, Mantegna S, Battaglia L, Cravotto G. Process Intensification in the Food Industry: Hydrodynamic and Acoustic Cavitation in Fresh MilkTreatment. Agro FOOD Ind. Hi Tech, 2014; 25: 55-59.
23. Gregersen SBL, Wiking DJ, Metto K, Bertelsen B, Pedersen KR, Poulsen U, Andersen M, Hammersh J. Hydrodynamic cavitation of raw milk: Effects on microbial inactivation, physical and functional properties, Int. Dairy J. 2020; 109, 104790, https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104790
24. Silva M, Zisu B, Chandrapala J. Influence of low-frequency ultrasound on the physico-chemical and structural characteristics of milk systems with varying casein to whey protein ratios. Ultrasonics Sonochemistry. 2018; 49, 268-276. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.015
25. Shanmugam A, Chandrapala J, Ashokkumar M. The effect of ultrasound on the physical and functional properties of skim milk, Innovative Food Sci. Emerg. Technol. 2012, 16: 251-258. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.06.005
26. Chandrapala J, Martin G, Zisu B, Kentish S and Ashokkumar M. The effect of

ultrasound on casein micelle integrity. Journal of dairy science. 2012; 95, 6882-6890. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5318

27. Bucci AJ, Van Hekken DL, Tunick MH, Renye JA, Tomasola PM. The effects of microfluidization on the physical, microbial, chemical, and coagulation properties of milk. Journal of Dairy Science. 2018; 101 (8): 6990-7001. . https://doi.org/10.3168/jds.2017-13907
28. Chandrapala J, Bui D, Kentish S, Ashokkumar M. Heat stability and acid gelation properties of calcium-enriched reconstituted skim milk affected by ultrasonication. J Dairy Res. 2014;81(2):238-44. https://doi.org/10.1017/S0022029914000132
29. Chouliara E, Georgogianni KG, Kanellopoulou N, Kontominas MG. Effect of ultrasonication on microbiological, chemical and sensory properties of raw, thermized and pasteurized milk. International Dairy Journal. 2010; 20: 307-313. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.12.006
30. Arya SS, Sawant O, Sachin K, Sonawane P, Show L, Waghamare A, Hilares R, Santos JCD. Novel, Nonthermal, Energy Efficient, Industrially Scalable Hydrodynamic Cavitation - Applications in Food Processing. Food Reviews International. 2019; https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669163
31. Savage GP, Dutta PC and Rodriguez-Estrada MT. Cholesterol oxides: their occurrence and methods to prevent their generation in foods. Asia Pacific journal of clinical nutrition. 2002; 11(1): 72-78. https://doi.org/10.1046/j.1440-6047.2002.00270.x
32. Juliano P, Torkamani AE, Leong T, Kolb V, Watkins P, Ajlouni S and Singh TK. Lipid oxidation volatiles absent in milk after selected ultrasound processing. Ultrasonics sonochemistry. 2014; 21 (6): 2165-2175. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.001
33. Thi Hong Bui A, Cozzolino D, Zisu B and Chandrapala J. Effects of high and low frequency ultrasound on the production of volatile compounds in milk and milk products - a review. Journal of Dairy Research. 2020; 87, 501-512. https://doi.org/10.1017/S0022029920001107
34. Mason T, Cobley A, Graves J and Morgan D. New evidence for the inverse dependence of mechanical and chemical effects on the frequency of ultrasound. Ultrasonics Sonochemistry. 2011; 18: 226-230. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.05.008
35. Woźniak D, Cichy W, Dobrzyńska M, Przysławski J, Drzymała-Czyż S. Reasonableness of Enriching Cow's Milk with Vitamins and Minerals. Foods. 2022; 11(8):1079. https://doi.org/10.3390/foods11081079
36. Pereira PC. Milk nutritional composition and its role in human health. Nutrition. 2014; 30:619-627.https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.10.011
37. Marangoni F, Pellegrino L, Verduci E, Ghiselli A, Bernabei R, Calvani R, Cetin I, Giampietro M, Perticone F, Piretta L. Cow's milk consumption and health: A health professional's guide. J. Am. Coll. Nutr. 2019; 38:197-208. https://doi.org/10.1080/07315724.2018.1491016
38. Claeys WL, Cardoen S, Daube G, De Block J, Dewettinck K, Dierick K, De Zutter L, Huyghebaert A, Imberechts H, Thiange P, Vandenplas Y, Herman L. Raw or heated cow milk consumption: Review of risks and benefits. Food Control. 2013; 31 (1): 251-262, https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.035
39. Claeys W, Cardoen S, Daube G, De Block J, Dewettinck K, Dierick K, et al. Raw or heated cow milk consumption: review of risks and benefits. Food control. 2013;31(1):251-62. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.035
40. Hagh Nazari S, Eskandar Nasab M, Moradi S, Memarian M. Pasteurizing the milk with the induction heating energy and evaluating its organoleptic properties. Journal of Food Research and Technology. 2019; 29 (1): 125-140.