مواد مرکب زیست تخریب‌پذیر و نقش آن‌ها در اصلاح خواص عملکردی فیلم‌های بسته‌بندی بر پایه پروتئین‌ها

محمد رضا عبدالهی مقدم [۱*]، ناصر صداقت [۲]

تاریخ دریافت مقاله: اردیبهشت ماه۱۳۹۳
تاریخ پذیرش مقاله: تیر ماه ۱۳۹۳

چکیده

فیلم‌های پروتئینی مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی، علی‌رغم دارا بودن مزایای زیاد همچون تخریب‌پذیری و تجدیدپذیری، دارای دو ضعف اساسی از قبیل ضعیف بودن خواص مکانیکی و نیز ممانعت‌کنندگی در برابر نفوذ بخار آب می‌باشند. تلاش‌ها برای بهبود خواص عملکردی فیلم‌های پروتئینی مختلف، از روش‌های اصلاح فرمولاسیون[۳]، ایجاد اتصالات عرضی بین مولکول‌ها و تهیه مواد مرکب بر پایه پروتئین‌ها، در سال‌های اخیر رو به افزایش بوده است. در این مقاله، تحقیقات انجام شده برای اصلاح خواص عملکردی فیلم‌های پروتئینی تهیه شده از منابع مختلف پروتئینی از طریق تهیه مواد مرکب بر پایه پروتئین‌ها، مرور شده است.

واژه‌های کلیدی

مواد مرکب، زیست تخریب‌پذیر، خواص عملکردی، فیلم و پروتئین.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از فیلم‌های پروتئینی، به عنوان مواد بسته‌بندی زیست تخریب‌پذیر، افزایش قابل توجهی یافته است. عموماً ضعیف‌تر بودن خواص عملکردی[۴] این فیلم‌ها نسبت به فیلم‌های سنتزی[۵]، یکی از اشکالات آن‌ها می‌باشد. اگر چه فیلم‌های پروتئینی نوعاً دارای خواص ممانعت‌کنندگی[۶] بسیار خوب در برابر گازها می‌باشند؛ اما نسبت به اغلب پلی‌مرهای سنتزی، عبوردهی نسبت به بخار آب (WVP)[۷] بیشتر و خواص مکانیکی ضعیف‌تری دارند. این فیلم‌ها باید دارای خواص انتقال جرم متناسب با کاربردشان در بسته‌بندی مواد غذایی باشند. انتقال و تبادل رطوبت، گازها، مواد معطر، طعم یا رنگ بین موادغذایی و محیط اطراف از طریق فیلم پروتئینی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای منجر به افت کیفیت ماده غذایی شود. برای مثال افت رطوبت در میوه‌ها و سبزیجات نگه‌داری شده برای زمان‌های طولانی ممکن است باعث افت وزنی و چروکیدگی سطحی آن‌ها شود و یا آجیل‌ها و سایر موادغذایی چرب، در صورت نفوذ مقدار زیادی اکسیژن از محیط به آن‌ها از طریق فیلم پروتئینی، ممکن است دچار ترشیدگی اکسیداتیو و در نتیجه افت محتوای تغذیه‌ای، تخریب بافت، طعم، رنگ، بو

۱- عضو هیات علمی پژوهشکده علوم و صنایع غذایی.
(* نویسنده مسئول: abdollahim1344@gmail.com)
۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد.

3- Formulation
4- Functional properties
5- Synthetic
6- Barrier properties
7- Water vapor permeability

و در نهایت افت کیفیت شوند. فیلم‌های پروتئینی ایده‌آل برای بسته‌بندی مواد غذایی بایستی محکم و انعطاف‌پذیر بوده به طوری که یکپارچگی خود را در حین جابه‌جایی و نگه‌داری ماده غذایی حفظ کرده و نیز عبوردهی نسبت به بخار آب و گاز متناسب با کاربرد خود داشته باشند. همچنین پروتئین‌ها به علت دارا بودن ساختار منحصر به فرد خود(تشکیل شده از ۲۰ اسید آمینه مختلف به عنوان واحدهای منومری[1])، می‌توانند پیوندهایی را در موقعیت‌های مختلف تشکیل داده و پتانسیل بالاتری را برای تشکیل اتصالات مختلف بین مولکولی، ارائه نمایند[۱]، لذا فیلم‌های ساخته شده از آن‌ها دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به بیوفیلم‌های[2] بر پایه پلی‌ساکاریدها[3] و چربی‌ها می‌باشند. در تحقیقات انجام شده تاکنون برای اصلاح خواص عملکردی فیلم‌های پروتئینی، تأثیر عواملی مانند فرمولاسیون و شرایط و روش‌های تهیه فیلم‌ها شامل افزودن نرم‌کننده‌ها[۲ و ۳]، تغییر[4] PH[۴و۵]، افزودن روغن‌ها و چربی‌ها[۶، ۷، ۸و ۹] ترکیب با مواد آبگریز[۱۰، ۱۱ و ۱۲]، کربوهیدرات‌ها[۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶] و پروتئین‌های دیگر[۱۷ و ۱۸]، همچنین ایجاد اتصالات عرضی در پروتئین‌ها از روش‌های حرارتی[۱۹و ۲۰]، شیمیایی[۲۱ و۲۲]، آنزیمی[۲۳ و۲۴] و تشعشعی[۲۲ و ۲۵] و بالاخره استفاده از نانوکامپوزیت‌ها[5][۲۶، ۲۷ و۲۸] مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالب گفته شده، برای استفاده از فیلم‌های پروتئینی در بسته‌بندی مواد غذایی، لازم است برخی خواص مکانیکی آن‌ها شامل استحکام کششی[6](TS)، انعطاف‌پذیری یا درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی[7](EB) و مدول الاستیک[8](EM) و نیز خواص ممانعت‌کنندگی آن‌ها در برابر گازها(به ویژه اکسیژن و دی اکسید کربن)، بخار آب و ترکیبات معطر[9]، اصلاح شود.

۲- فیلم‌های مرکب و اثر آن بر خواص عملکردی فیلم‌های پروتئینی

هنگامی که یک ماده پلی‌ساکاریدی(مانند نشاسته و مشتقات آن، ترکیبات سلولزی، کیتوزان[10]، صمغ و غیره) ،یک پروتئین دیگر، ماده چرب و یا یک ماده آبگریز و مواد پرکننده با پروتئین اصلی ترکیب می‌شود، فیلم مرکب[11] یا آمیخته[12] تولید می‌شود. فیلم مرکب می‌تواند از لایه نشانی دو و یا چند لایه منفرد فیلم نیز حاصل شود. فیلم‌های مرکب بر پایه پروتئین، با هدف بهبود خواص عملکردی فیلم‌های پروتئینی توسعه یافته‌اند.

۲-۱- فیلم‌های مرکب پروتئین/ پلی‌ساکارید و بررسی خواص عملکردی آن‌ها

زونو[13] و همکاران(۲۰۰۹) فیلم‌های مرکب گلوتن گندم[14] / متیل سلولز[15](MC) را به روش محلول[16] تهیه کرده و خواص مکانیکی و نیز بازدارندگی آن‌ها را در برابر بخار آب مورد مطالعه قرار دادند[۱۶]. آن‌ها ۵٪ وزنی گلوتن گندم[17](WG) و۲/۵٪ وزنی متیل سلولز(MC) را به طور جداگانه در محلول آبی آمونیاکی(۱۳٪ وزنی آمونیاک) حل کرده و محلول‌های به دست آمده را با نسبت‌های مختلف با یکدیگر مخلوط کردند، به طوری که نسبت اختلاط[18] یا X_{MC} که همان نسبت وزنی متیل سلولز به وزن کل بیوپلی‌مر بود از صفر تا یک تغییر کرد. همچنین

مواد مرکب زیست تخریب‌پذیر و نقش آن‌ها در اصلاح خواص عملکردی فیلم‌های بسته‌بندی بر پایه پروتئین‌ها

1- Monomeric units
2- Biofilms
3- Polysaccharide
۴- یک کمیت لگاریتمی که میزان اسیدی یا بازی بودن مواد را مشخص می‌کند.
5- Nanocomposite
6- Tensile strength
7- Percentage of elongation at break
8- Elastic modulus
9- Aroma compounds
10- Methyl Cellulose
11- Composite film
12- Blended film
13- Zuo et al
14- Gluten
15- Methyl Cellulose
16- Solution casting
17- Wheat gluten
18- Mixing ratio

مقدار گلیسیرین[1] اضافه شده به عنوان نرم‌کننده به محلول نهایی طوری تنظیم شد که محتوای گلیسرین فیلم‌های نهایی ۲۵٪ وزنی بود. فیلم‌های تهیه شده به مدت ۳۰ دقیقه درون آون[2] تحت تیمار حرارتی در دو دمای ۱۰۰ و ۱۲۵ °C به منظور ایجاد اتصالات عرضی در فاز پروتئینی، قرار گرفتند. خواص مکانیکی فیلم‌های مرکب در(جدول ۱) آورده شده است.

متیل سلولز در محلول نهایی تشکیل‌دهنده فیلم(افزایش X_{MC}) روال افزایشی را نشان داد. بنابراین افزودن محلول متیل سلولز به محلول تشکیل‌دهنده فیلم گلوتن گندم، باعث بهبود خواص عملکردی فیلم گلوتن گندم از طریق افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری آن شد. همچنین مقادیر جذب رطوبت[4](MA) و WVP فیلم‌ها در(جدول ۲) آورده

جدول ۱- مقادیر ضخامت فیلم(H)، مدول یانگ(E)، استحکام کششی(δ_b) و درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی(ε_b) فیلم‌های مرکب گلوتن گندم / متیل سلولز تیمار حرارتی شده در دو دمای ۱۰۰ و ۱۲۵ °C

	100°C				125°C			
	H (μm)	E (MPa)	σ_b (MPa)	ε_b (%)	H (μm)	E (MPa)	σ_b (MPa)	ε_b (%)
0	90.8 ± 2.5	80.5 ± 9.3	1.7 ± 0.1	10.2 ± 4.8	90.0 ± 5.1	570 ± 36.2	5.1 ± 0.6	40.2 ± 2.5
0.20	97.5 ± 4.8	122.3 ± 7.1	4.7 ± 0.2	25.0 ± 3.8	117.0 ± 10.4	720.3 ± 28.8	8.0 ± 0.7	45.6 ± 2.5
0.30	85.0 ± 4.3	100.5 ± 22.4	3.8 ± 1.1	30.4 ± 7.3	86.5 ± 6.0	1100.8 ± 18.3	8.1 ± 0.9	30.5 ± 3.0
0.40	96.0 ± 5.0	150.9	6.0 ± 0.3	28.9 ± 1.1	79.3 ± 4.2	1300.3 ± 9.5	15.2 ± 0.8	26.9 ± 1.1
0.51	79.7 ± 4.0	261.0 ± 42.7	13.6 ± 1.4	20.8 ± 2.4	88.7 ± 8.0	2200 ± 80.2	18.1 ± 1.2	11.1 ± 0.4
0.80	83.2 ± 8.4	400.9 ± 94.3	21.8 ± 1.3	7.1 ± 1.9	88.7 ± 0.7	2400.1 ± 47.1	20.5 ± 0.5	8.5 ± 1.5
1.20	64.7 ± 8.4	418.8 ± 29.3	20.0 ± 1.4	5.0 ± 1.0	83.9 ± 11.8	1870.3 ± 9.2	14.1 ± 1.6	7.1 ± 1.2
1.80	53.0 ± 2.8	443.8 ± 18.2	21.2 ± 1.8	5.2 ± 2.1	78.3 ± 12.3	1900.4 ± 9.4	20.3 ± 1.8	7.4 ± 1.7
1.90	63.0 ± 5.3	508.8 ± 182.1	27.8 ± 5.0	5.8 ± 2.1	73.0 ± 13.2	1700.4 ± 20.5	18.8 ± 1.3	6.1 ± 1.4
2.00	77.3 ± 4.8	608.8 ± 94.3	44.0 ± 8.2	6.0 ± 2.21	68.0 ± 14.1	980 ± 11.8	10.8 ± 1.3	3.8 ± 1.6

جدول ۲- مقادیر جذب رطوبت(MA) و WVP فیلم‌های مرکب گلوتن گندم / متیل سلولز تیمار حرارتی شده در دمای ۱۲۵ °C و در رطوبت‌های نسبی مختلف

X_{MC}	MA (wt%)		WVP (10^{-11} g m⁻¹ s⁻¹ Pa⁻¹)	
	29% RH	87% RH	29% RH	87% RH
0	7.5 ± 0.8	17.3 ± 2.4	ND[a]	ND
0.20	/	/	1.37 ± 0.42	24.08 ± 4.75
0.30	5.0 ± 1.3	17.6 ± 3.2	3.08 ± 0.78	27.2 ± 5.20
0.40	/	/	2.29 ± 0.61	26.2 ± 4.9
0.51	/	/	4.58 ± 1.2	24.7 ± 5.30
0.80	4.3 ± 0.9	22.8 ± 0.2	4.20 ± 0.9	27.8 ± 6.9
1.20	5.3 ± 0.5	21.8 ± 1.6	4.61 ± 1.1	28.4 ± 5.8
1.80	5.5 ± 0.6	25.0 ± 2.4	4.8 ± 1.2	29.1 ± 6.0
1.90	/	/	5.0 ± 1.1	30.2 ± 6.4
2.00	6.4 ± 0.8	33.4 ± 2....	5.2 ± 1.3	31.7 ± 6.8

[a] WVP فیلم گلوتن گندم به دلیل شکستن آن قابل اندازه‌گیری نبود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر مدول یانگ[3]، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی فیلم‌های تیمار حرارتی شده در هر دو دما، با افزایش میزان

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر جذب رطوبت فیلم‌های مرکب در رطوبت نسبی ۲۹٪ کم بوده و با افزایش میزان متیل سلولز در محلول نهایی تشکیل‌دهنده فیلم(افزایش X_{MC}) تغییرات آن معنادار نبود($P>0/05$)؛

1- Glycerine
2- Oven
3- Young models
4- Mixing ratio

جدول ۳- خواص فیزیکی مکانیکی فیلم‌های مرکب SP/ red algae

SP (g)	Red algae (g)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	WVP (10^{-9} g m/ m^2 s Pa)
3	0	$3.05^{a} \pm 0.19$	$34.42^{ab} \pm 6.18$	$2.25^{a} \pm 0.15$
2.5	0.5	$3.63^{cd} \pm 0.10$	$41.24^{a} \pm 6.27$	$2.21^{a} \pm 0.23$
2.3	0.7	$4.01^{c} \pm 0.04$	$39.32^{a} \pm 7.53$	$2.09^{a} \pm 0.18$
2.1	0.9	$4.70^{b} \pm 0.33$	$37.47^{a} \pm 5.89$	$1.99^{a} \pm 0.41$
1.8	1.2	$6.87^{a} \pm 0.36$	$31.66^{ab} \pm 8.03$	$1.98^{a} \pm 0.11$

مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی متفاوت مطابق آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری داوند.

اما در رطوبت نسبی ۸۷٪ با افزایش X_{MC} مقادیر آن به طور معناداری افزایش نشان داد($P<0/05$). همچنین با افزایش X_{MC} مقادیر WVP فیلم‌های مرکب در رطوبت‌های نسبی ۲۹٪ و ۵۵٪ به طور معناداری افزایش یافت($P<0/05$) در صورتی که در رطوبت نسبی ۸۷٪ تغییرات آن معنادار نبود($P>0/05$).

سونگ[1] و همکاران(۲۰۱۳) فیلم‌های مرکب پروتئین آرد دانه آفتابگردان / جلبک قرمز را به روش محلول تهیه کرده و خواص فیزیکی - مکانیکی آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند[۱۵]. محلول‌های آبی تشکیل‌دهنده فیلم مرکب شامل حدود ۳٪ وزنی پروتئین آرد دانه آفتابگردان[2](SP)، ۳٪ وزنی نرم‌کننده(مخلوط با نسبت وزنی ۱ : ۲ = فروکتور: ساکاروز) و جلبک‌های قرمز[3] با نسبت‌های وزنی۱/۲ : ۱/۸ و۰/۹ : ۲/۱ ،۰/۷ : ۲/۳ ،۰/۵ : ۲/۵ ،۰ : ۳ = red algae : SP بودند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش میزان جلبک قرمز در فرمولاسیون[4] فیلم مرکب، استحکام کششی فیلم‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت، ضمن آن که فیلم با نسبت وزنی ۰/۵ : ۲/۵ = red algae : SP دارای بیشترین مقدار درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی(۴۱/۲۴٪) و فیلم با نسبت وزنی۱/۲ : ۱/۸ = red algae : SP دارای کمترین مقدار درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی(۳۱/۶۶٪) بود. بنابراین افزودن جلبک‌های قرمز به محلول تشکیل‌دهنده فیلم پروتئین آرد دانه آفتابگردان، باعث بهبود خواص عملکردی فیلم پروتئین آرد دانه آفتابگردان از طریق افزایش استحکام آن شد. همچنین افزودن جلبک قرمز به فرمولاسیون فیلم‌ها، به احتمال ۹۵٪ تأثیری در میزان عبوردهی آن‌ها نسبت به بخار آب نداشت($P>0/05$). خواص فیزیکی مکانیکی فیلم‌های مرکب مذکور در(جدول ۳) آورده شده است.

اسس[5] و همکاران(۲۰۰۹) فیلم‌های مرکب خوراکی ایزوله پروتئین آب پنیر/ صمغ کهور[6](MG) را به روش محلول تهیه کرده و خواص فیزیکی - مکانیکی آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند[۱۴]. آن‌ها محلول آبی ۱۰٪ وزنی ایزوله پروتئین آب پنیر[7](WPI) و محلول آبی ۱۰٪ وزنی صمغ کهور(MG) را با نسبت‌های ۱۰۰ : ۰ و ۷۵ : ۲۵ ، ۵۰ : ۵۰ ، ۲۵ : ۷۵ ، ۰ : ۱۰۰ = MG : WPI با هم مخلوط کرده و سپس ۳۰٪ وزنی نرم‌کننده سوربیتول[8] را بر مبنای وزن خشک پیو پلی‌مرها به مخلوط اضافه کرده و به روش محلول، فیلم‌های مرکب را تهیه نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها همان‌طور که در(جدول ٤) آمده، نشان داد که

1- Song et al
2- Sunflower seed meal protein
3- Red algae
4- Formulation
5- Oses et al
6- Mesquite gum
7- Whey protein isolate
8- Sorbitol

عبوردهی نسبت به بخار آب فیلم‌ها چندان متأثر از غلظت صمغ مورد نظر نبود. آن‌ها علت این امر را این گونه توضیح دادند که از آن جا که WVP فیلم‌ها تابع میزان حلالیت آب در آن‌ها[و یا محتوای رطوبت آن‌ها (MC)[1]] و نیز نفوذ مولکول‌های آب از میان ماتریس[2] فیلم بوده و از طرفی با توجّه به این که نفوذپذیری[3](D) فیلم‌ها(که مقادیر آن در جدول ٤ آورده شده است) و نیز محتوای رطوبت آن‌ها(که مقادیر آن در جدول ٥ آورده شده است) مشابه هم می‌باشد، بنابراین احتمالاً تغییر درصد وزنی صمغ، بر WVP فیلم‌ها تأثیر چندانی نخواهد داشت. همچنین آن‌ها خواص مکانیکی فیلم‌های نگه‌داری شده در دو شرایط رطوبت نسبی ٥٠٪ و ٧٠٪ در دمای اطاق، شامل استحکام کششی(TS)، درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی(E_b) و مدول یانگ یا مدول الاستیک[4](EM) را مورد ارزیابی قرار دادند.

نتایج به دست آمده که در(جدول ٥) آورده شده، نشان می‌دهد که با افزایش محتوای صمغ فیلم‌ها، کاهش قابل ملاحظه‌ای در استحکام کششی و مدول الاستیک فیلم‌های نگه‌داری شده در هر دو شرایط درصد رطوبت، حاصل شد. همچنین درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی فیلم‌های نگه‌داری شده در رطوبت نسبی ٥٠٪ با افزایش محتوای صمغ آن‌ها، به طور قابل توجّهی افزایش یافت در صورتی که E_b فیلم‌های نگه‌داری شده در رطوبت نسبی ٧٥٪ با افزایش محتوای صمغ آن‌ها به طور پیوسته افزایش نیافت.

نتایج اخیر به دست آمده، نشان داد که صمغ مذکور خاصیت نرم‌کنندگی به فیلم‌ها داده و بنابراین محققان مذکور پیشنهاد استفاده از صمغ MG را به عنوان جایگزین استفاده از مقادیر زیاد نرم‌کننده‌های با وزن مولکولی کم، برای بهبود خواص مکانیکی فیلم‌های[5] WPI دادند.

جدول ٤- مقادیر نفوذ پذیری(D)، WVP، PH، کشش سطحی[1] و ضخامت فیلم[2] فیلم‌های مرکب MG/WPI[A]

ratio WPI/MG	pH	Surface tension (mN/m)			
WPI	6.9±0.01 a	65.1±0.3 a			
7/25	6.6±0.02 b	54.5±0.6 a			
7/50	6.3±0.02 c	54.7±0.3 a			
5/75	5.8±0.03 d	55.1±0.4 a			
MC	4.9±0.03 e	69.8±0.3 b			

[A] مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی یکسان مطابق آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

[B] گرادیان رطوبت نسبی دو طرف فیلم عبارت بودند از: ٨٧/٠(WPI) و ٨٥/٠(فیلم‌های دیگر)- 1- Surface tension 2- Film thickness

جدول ٥- خواص فیزیکی - مکانیکی فیلم‌های مرکب MG / WPI

ratio WPI/MG	MC (%)				
WPI	12.2±0.2 a				
5/75	10.0±0.2 b				
WPI	9.8±0.3 b				
5/75	7.1±0.2 c				

[*] مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی یکسان مطابق آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

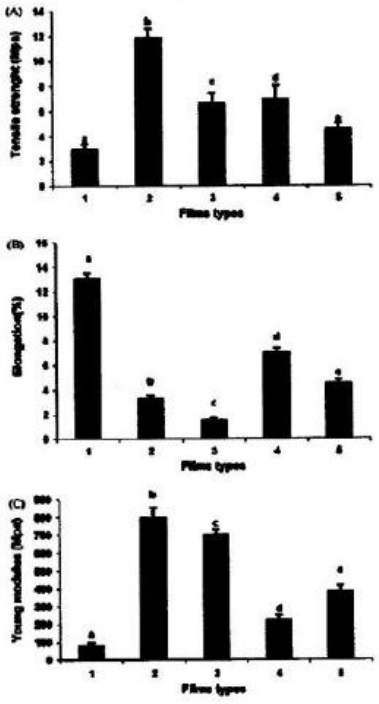
1- Moisture content
2- Matrix
3- Diffusivity
4- Modulud of elastic
5- Whey protein isolate

۲-۲- فیلم‌های مرکب پروتئین / پروتئین و بررسی خواص عملکردی آن‌ها

قنبرزاده[1] و ارومیه‌ای(۲۰۰۸) فیلم منفرد کنسانتره[2] پروتئین آب پنیر همراه با نرم‌کننده گلیسرین و فیلم‌های منفرد زئین[3] همراه با نرم‌کننده گلیسرین یا روغن زیتون را به روش محلول و نیز فیلم‌های مرکب پروتئین آب پنیر- گلیسرین / زئین - گلیسرین و پروتئین آب پنیر- گلیسرین / زئین - روغن زیتون را به روش لایه نشانی پرس سرد[4] تهیه نمودند[۱۸]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که فیلم‌های مرکب دارای استحکام کششی و مدول یانگ بیشتر و درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی کمتر از فیلم منفرد آب پنیر می‌باشند. خواص کششی فیلم‌ها در(نمودار ۱) نشان داده شده است.

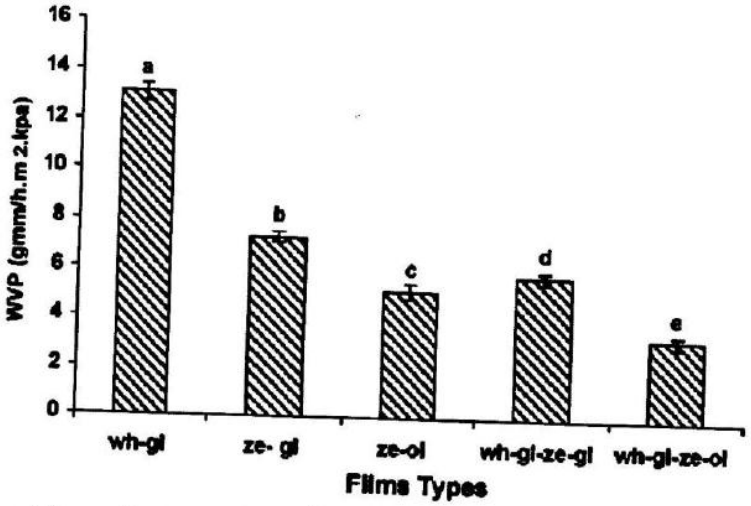
همچنین از جمله نتایج تحقیقات محققان مذکور آن بود که فیلم‌های مرکب دارای خاصیت عبوردهی نسبت به بخار آب بسیار کمتر از فیلم منفرد کنسانتره آب پنیر بودند. مقادیر عبوردهی نسبت به بخار آب انواع فیلم‌ها در(نمودار ۲) نشان داده شده است.

کائو[5] و همکاران(۲۰۰۷) فیلم‌های مرکب ایزوله[6] پروتئین سویا / ژلاتین را به روش محلول تهیه کرده و خواص فیزیکی مکانیکی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند[۱۷]. آن‌ها محلول آبی ۱۰٪ وزنی تشکیل‌دهنده فیلم ایزوله پروتئین سویا[7](SPI) همراه با گلیسرین(با غلظت ۱۰٪ وزنی ایزوله پروتئین سویا) را با نسبت‌های وزنی مختلف با محلول آبی ۱۰٪ وزنی تشکیل‌دهنده فیلم ژلاتین[8] همراه با گلیسرین(با غلظت ۱۰٪ وزنی ژلاتین) مخلوط کرده و به روش محلول، در نهایت فیلم‌های مرکب با نسبت‌های وزنی ژلاتین : ایزوله پروتئین سویا برابر ۱۰:۰، ۸ : ۲، ٤ : ٦، ٦ : ٤، ۸ : ۲ و ۱۰ : ۰ تهیه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت ژلاتین در فیلم‌های مرکب، استحکام کششی(TS)، درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی(EB) و مدول الاستیک(EM) آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. بنابراین افزودن محلول ژلاتین به محلول تشکیل‌دهنده فیلم ایزوله پروتئین سویا، باعث بهبود خواص عملکردی فیلم ایزوله پروتئین سویا از طریق افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری آن شد. خواص مکانیکی فیلم‌های مرکب با نسبت‌های وزنی مختلف SPI : Gelatin در(نمودار ۳) نشان داده شده است.

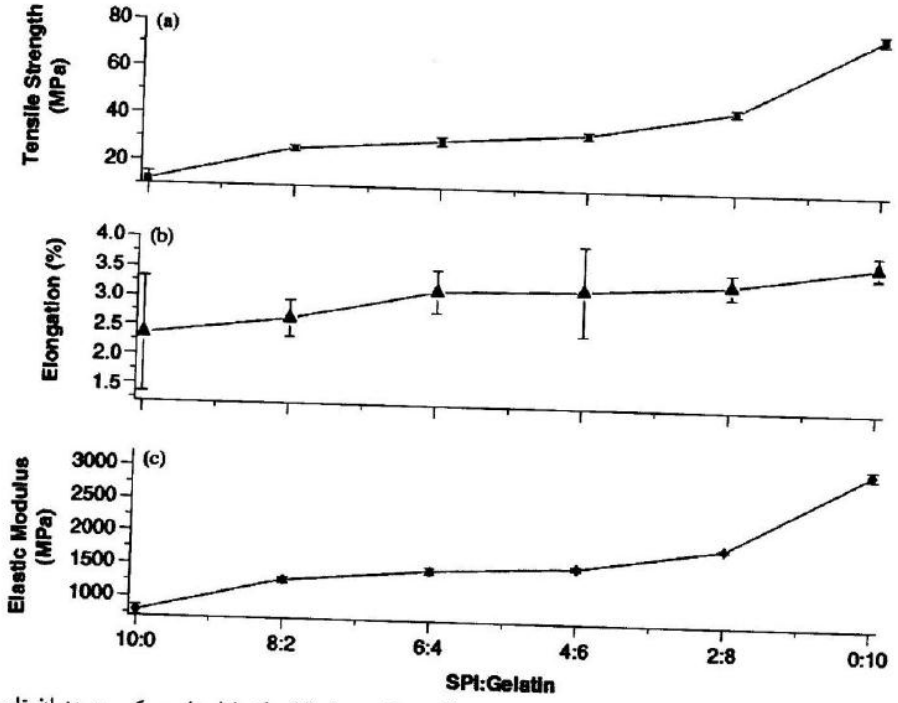


نمودار ۱- خواص کششی انواع فیلم‌های منفرد و مرکب: ۱- فیلم پروتئین آب پنیر- گلیسرین، ۲- فیلم زئین- گلیسرین، ۳- فیلم زئین- روغن زیتون، ٤- فیلم زئین- گلیسرین/ پروتئین آب پنیر- گلیسرین، ٥- فیلم زئین- روغن زیتون / پروتئین آب پنیر- گلیسرین. حروف یکسان روی ستون‌ها نشان‌دهنده معنادار نبودن تفاوت‌ها می‌باشد.

1- Ghanbarzadeh & oromiehi
2- Concentrate
3- Zein
4- Cold press lamination
5- Cao et al
6- Isolate
7- Soy protein isolate
8- Gelatin



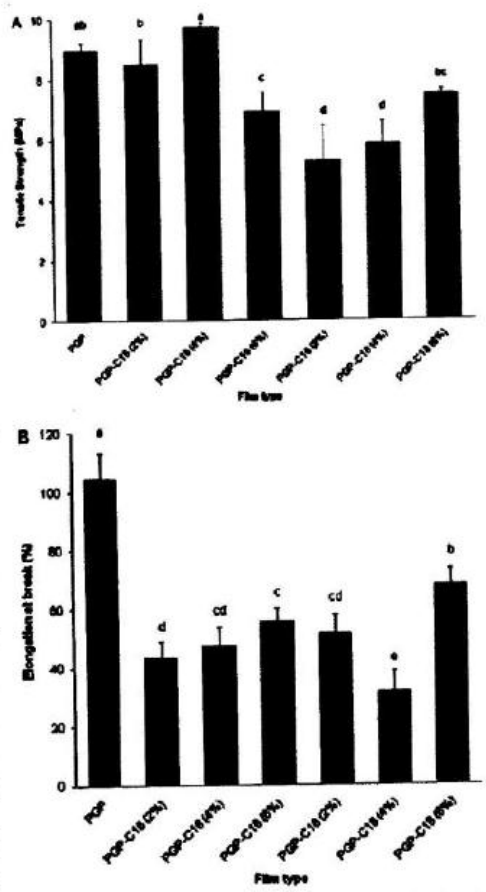
نمودار۲- عبوردهی نسبت به بخار آب فیلم‌های منفرد و مرکب کنسانتره آب پنیر / زئین



نمودار ۳- a، استحکام کششی؛ b، ازدیاد طول تا نقطه پارگی و C، مدول الاستیک فیلم‌های مرکب به عنوان تابعی از نسبت‌های وزنی

۲-۳- فیلم‌های مرکب پروتئین / ماده آب گریز و بررسی خواص عملکردی آن‌ها

زاهدی[1] و همکاران(۲۰۱۰) فیلم‌های مرکب پروتئین گلبولین[2] پسته/ اسید چرب را تهیه کرده و خواص فیزیکی مکانیکی آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند[۱۲]. آن‌ها به محلول آبی٦ ٪(W/V) پروتئین گلبولین پسته[3](PGP)، گلیسرین(با غلظت ۱۰۰٪ وزنی PGP) اضافه نموده و آنگاه با افزودن اسیدهای چرب پالمیتیک[4](C16) یا استاریک[5](C18) به میزان ۲٪ ، ٤٪ و ٦٪ وزنی PGP همراه با امولسیفایرتوین[6] ۸۰۰(با غلظت ۱۰٪ وزنی اسید چرب)، به محلول، به روش‌تر، فیلم‌های امولسیفای شده تهیه نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که عبوردهی نسبت به بخار آب فیلم‌های امولسیفای شده، حدوداً ٤۳٪ - ۳۷٪ با افزایش اسید چرب کاهش یافت اگر چه تفاوت معناداری در مقادیر عبوردهی نسبت به بخار آب فیلم‌ها با تغییر نوع و درصد وزنی اسید چرب، مشاهده نشد. همچنین افزایش اسیدهای چرب، موجب کاهش جزئی عبوردهی نسبت به اکسیژن فیلم‌های مذکور شد؛ اما تفاوت در مقادیر عبوردهی فیلم‌ها با تغییر نوع و درصد وزنی اسید چرب، معنادار نبود. بنابراین افزودن اسیدهای چرب پالمیتیک یا استاریک به محلول تشکیل‌دهنده فیلم پروتئین گلبولین پسته، موجب بهبود خواص عملکردی فیلم پروتئین گلبولین پسته از طریق کاهش قابل ملاحظه عبوردهی نسبت به بخار آب آن شد. ضمناً استحکام کششی فیلم‌های امولسیفای شده، با افزودن هر مقدار اسید چرب(به جز ٤٪ اسید پالمیتیک) کاهش یافت. ازدیاد طول تا نقطه پارگی فیلم‌های امولسیفای شده نیز با افزودن نوع و مقادیر مختلف اسید چرب، ۷۰٪- ۳۵٪ کاهش را نشان داد. مقادیر محتوای رطوبت، عبوردهی نسبت به بخار آب، حلالیت در آب و عبوردهی نسبت به اکسیژن(اندازه‌گیری شده به طور غیرمستقیم برحسب مقدار پراکسید) فیلم‌های امولسیفای شده در(جدول ٦) آورده شده است. همچنین خواص مکانیکی فیلم‌ها با توجه به نوع فیلم[7] در(نمودار ٤) نشان داده شده است.



نمودار ٤- خواص مکانیکی فیلم‌های پروتئین گلبولین پسته با و بدون اسید چرب، A : استحکام کششی نهایی و B : ازدیاد طول تا نقطه پارگی. حروف متفاوت در شکل، بیانگر تفاوت معنادار($P < ۰/۰۵$) مطابق با آزمون LSD می‌باشد.

1- Zahedi et al
2- Globulin
3- Pistachio globulin protein
4- Palmitic acid
5- Stearic
6- Tewin
7- Film type

آنکر و همکاران[1](۲۰۰۲) فیلم‌های مرکب ایزوله پروتئین آب پنیر/ منوگلیسیرید استیله شده[2] را به دو روش لایه نشانی و امولسیون[3] با هدف بهبود خاصیت ممانعت‌کنندگی فیلم‌ها در برابر بخار آب تهیه کردند[۱۰]. فیلم‌های تهیه شده از طریق لایه نشانی، نسبت به فیلم‌های WPI بدون چربی، ۷۰ برابر عبوردهی نسبت به بخار آب را کاهش دادند. همچنین عبوردهی نسبت به بخار آب فیلم‌های تهیه شده از روش امولسیون نصف مقدار مربوط به فیلم‌های WPI بدون چربی بود. از نظر تأثیر بر خواص مکانیکی، نتایج نشان داد که چربی(منوگلیسیرید استیله شده) عملکردی همچون ماده نرم‌کننده با زیاد کردن خواص شکست فیلم‌های تهیه شده از روش امولسیون داشت.

گنزالس[4] و آلوارز فیلم‌های مرکب دولایه پروتئین سویا / پلی لاکتیک اسید را تهیه کرده و خواص آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند[۱۱].

آن‌ها ابتدا فیلم SPI نرم شده توسط گلیسیرین را به روش محلول تهیه کردند. سپس محلول تشکیل‌دهنده فیلم پلی‌لاکتیک اسید[5](PLA) را بر روی فیلم مذکور ریخته و آن را خشک نموده و فیلم‌های مرکب با نسبت‌های وزنی SPI : PLA = ۱۰۰ : ۰ ، ۶۰ : ۴۰ و ۵۰ : ۵۰ تهیه کردند.

نتایج تحقیقات آن‌ها همان‌طور که در(جدول ۷) آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت PLA در فرمولاسیون فیلم مرکب از آن جایی که این ماده به عنوان یک بیوپلی‌مر آبگریز شناخته می‌شود، میزان WVP فیلم‌ها به طور قابل توجّهی کاهش یافت. همچنین خواص مکانیکی فیلم‌های مرکب که در(جدول ۸) آورده شده نشان می‌دهد که حضور PLA و افزایش نسبت آن در فرمولاسیون فیلم‌های مرکب، موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر استحکام کششی(TS) و مدول یانگ(E) فیلم‌ها و کاهش درصد ازدیاد طول در نقطه پارگی(EB) آن‌ها شد.

جدول ٦- محتوای رطوبت(بر مبنای تر)، عبوردهی نسبت به بخار آب، حلالیت در آب و مقدار پراکسید فیلم‌های پروتئین گلبولین پسته با و بدون اسید چرب

Film type	Moisture content* (%)	WVP* (g mm/m² kPa d)	Water solubility* (%)	Peroxide value* (meq O_2/kg oil)
PGP	37.36 ± 2.355^{a}	96.203 ± 7.33^{a}	44.814 ± 5.010^{a}	23.342 ± 0.439^{a}
PGP-C_{18} (2%)	34.16 ± 3.798^{abc}	60.706 ± 2.34^{b}	41.481 ± 2.568^{a}	21.788 ± 0.512^{a}
PGP-C_{18} (4%)	36.20 ± 3.114^{ab}	58.903 ± 1.51^{b}	42.235 ± 1.986^{a}	21.795 ± 1.112^{a}
PGP-C_{18} (6%)	34.20 ± 3.701^{abc}	57.302 ± 1.52^{b}	43.494 ± 0.838^{a}	22.069 ± 0.815^{a}
PGP-C_{16} (2%)	36.40 ± 3.049^{a}	59.1 ± 3.36^{b}	41.708 ± 3.666^{a}	22.973 ± 4.212^{a}
PGP-C_{16} (4%)	34.40 ± 2.701^{abc}	56.74 ± 1.32^{b}	39.211 ± 1.368^{a}	23.291 ± 2.791^{a}
PGP-C_{16} (6%)	34.76 ± 3.562^{bc}	55.497 ± 6.09^{b}	42.504 ± 3.251^{a}	23.210 ± 3.000^{a}

* مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی متفاوت مطابق آزمونLSD، تفاوت معنی‌داری دارند.

جدول ۷ – WVP، محتوای رطوبت، ماده محلول کل[3](TSM)واندیس تورم[4](S)فیلم‌های مرکب SPI / PLA

Film	S (%)	TSM (%)	WVP ($.10^{-11}$ g m Pa^{-1} s^{-1} m^{-2})	MC (%)
SPI	1005.4 ± 56.2^{b}	83.4 ± 10.4^{b}	14.9 ± 0.5^{a}	32.3 ± 2.3^{b}
SPI–PLA 60/40	209.3 ± 10.8^{a}	32.0 ± 15.2^{a}	3.4 ± 0.1^{b}	27.5 ± 2.5^{b}
SPI–PLA 50/50	185.4 ± 12.4^{a}	40.1 ± 5.0^{a}	2.3 ± 0.1^{c}	18.5 ± 3.4^{a}

مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی یکسان مطابق آزمون توکی، تفاوت معنی‌داری ندارند.

1- Anker et al
2- Acetylated monoglyceride
3- Emulsion
4- Gonzales & Alvarez Igarzbal
5- Poly lactic acid

بدین معنا که فیلم‌های مرکب حاصل، دارای استحکام بیشتر و کشش‌پذیری کمتری شدند. بنابراین تهیه فیلم مرکب بر پایه پروتئین سویا با افزودن فیلمی از PLA به عنوان یک بیوپلی‌استر آبگریز به آن، موجب بهبود خواص عملکردی فیلم پروتئین سویا از طریق کاهش قابل توجه عبوردهی نسبت به بخار آب و افزایش استحکام کششی آن شد.

۲-٤- فیلم‌های مرکب پروتئین / ماده پرکننده و بررسی خواص عملکردی آن‌ها

پردا و همکاران[1] (۲۰۱۱) فیلم‌های مرکب بر پایه کازئینات سدیم[2] (SC)، تقویت شده با الیاف استات سلولز[3] (CA) یا کربوکسی متیل سلولز[4] (CMC) را به روش محلول تهیه کرده و خواص فیزیکی مکانیکی آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند[۲۹].

مطابق گزارش آن‌ها نوع و غلظت پرکننده‌های مذکور(حداکثر تا ۳٪ وزنی فیلم بر مبنای خشک) تأثیر معناداری بر مقادیر WVP فیلم‌های مرکب نداشت در صورتی که با افزایش غلظت پرکننده‌ها، مدول یانگ و استحکام کششی فیلم‌ها افزایش و ازدیاد طول تا نقطه پارگی آن‌ها کاهش یافت.

سونگ و همکاران(۲۰۱۳) فیلم‌های مرکب پروتئین پودر دانه آفتابگردان / نانورس را به روش محلول تهیه کرده و خواص عملکردی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند(۲٦). فیلم‌های مورد مطالعه آن‌ها شامل مخلوط نرم‌کننده با نسبت وزنی ۱ : ۲ = فروکتوز[5]: ساکاروز[6] و نانورس[7] (Cloisite Na+) با ۷ و ۵ ، ۳ ، ۱ درصد وزنی نسبت به پروتئین پودر دانه آفتابگردان(SP) بودند. مقادیر خواص فیزیکی مکانیکی فیلم‌های نانو کامپوزیتی مذکور در(جدول ۹) آورده شده است.

جدول۸- خواص مکانیکی فیلم‌های مرکب SPI / PLA

Film	EB (%)	TS (MPa)	E (MPa)	Thickness (μm)
SPI 100	24.63 ± 0.13^{b}	1.08 ± 0.34^{a}	22.80 ± 6.14^{a}	45 ± 8^{a}
SPI–PLA 60/40	1.09 ± 0.09^{a}	8.57 ± 1.61^{b}	1085 ± 134^{b}	51 ± 6^{a}
SPI–PLA 50/50	1.25 ± 0.02^{a}	13.69 ± 0.94^{c}	1579 ± 52^{c}	54 ± 5^{a}

مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی یکسان مطابق آزمون توکی، تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول۹ – خواص فیزیکی مکانیکی فیلم‌های نانو کامپوزیتی SP /Cloisite Na+ به ازاء غلظت‌های مختلف Cloisite Na+

Cloisite Na+ (%)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	WVP (10^{-9} g m/ m^2 s Pa)
0	$3.05^{bc} \pm 0.19$	$34.42^{b} \pm 6.18$	$2.25^{a} \pm 0.15$
1	$3.49^{b} \pm 0.52$	$42.37^{a} \pm 6.74$	$1.74^{b} \pm 0.11$
3	$5.24^{a} \pm 0.55$	$21.10^{c} \pm 5.28$	$1.73^{b} \pm 0.02$
5	$2.97^{bc} \pm 0.07$	$17.98^{c} \pm 0.77$	$1.70^{b} \pm 0.07$
7	$2.65^{c} \pm 2.00$	$17.15^{c} \pm 4.95$	$1.69^{b} \pm 0.01$

مقادیر واقع در یک ستون با حروف انگلیسی متفاوت مطابق آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری دارند.

1- Pereda et al
2- Sodium caseinate
3- Cellulose acetate
4- Carboxymethyl cellulose
5- Fructose
6- Sucrose
7- Nanoclay

مشاهده می‌شود که با افزایش محتوای نانورس فیلم‌ها، ازدیاد طول تا نقطهٔ پارگی و WVP آن‌ها کاهش یافت. همچنین با افزایش غلظت نانورس(تا میزان ۳٪) ، استحکام کششی فیلم‌ها افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر غلظت تا(میزان ۷٪)، مقدار آن کاهش یافت که این امر را می‌توان به تجمع بیشتر نانو ذرات Cloisite Na+ در غلظت‌های بالاتر و در نتیجه کاهش سطح تماس آن‌ها با بستر پروتئین پودر دانه آفتابگردان و متعاقب آن تحرک بیشتر زنجیرهای SP و در نتیجه کاهش استحکام آن‌ها مرتبط دانست.

فیلم آلژینات سدیم[2](SA) همراه با گلیسرین(با غلظت ۵۰٪وزنی SA) را با نسبت‌های مختلف(جمعاً تعداد ۱۰ محلول فیلم مرکب) با یکدیگر مخلوط کرده و به روش محلول، فیلم‌های مرکب تهیه نمودند که ویژگی‌های فیلم‌های مذکور در(جدول ۱۰) آورده شده است.

تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که فیلم‌هایی با نسبت وزنی WPI : G : SA = ۱۰ : ۱۷/۵ : ۲۲/۵ دارای بهترین خواص مکانیکی شامل استحکام کششی(TS)، استحکام در برابر سوراخ شدن[3](PT)، درصد ازدیاد طول تا نقطه پارگی(E) و استحکام پارگی[4](TT) بودند.

جدول ۱۰- ضخامت، نسبت پودر خشک[1] و حجم تعیین شده در فیلم[2] فیلم‌های مرکب ایزوله پروتئین آب پنیر / ژلاتین / آلژینات سدیم

Sample name	Determined volume per film (ml)	Dry powder ratio WPI:G:SA	Thickness (µm)
WPIGSA-1	40	20:8:12	50
WPIGSA-2	50	10:25:15	50
WPIGSA-3	60	12:12:36	50
WPIGSA-4	40	14:14:12	50
WPIGSA-5	50	17.5:10:22.5	50
WPIGSA-6	50	10:17.5:22.5	50
WPIGSA-7	50	15:15:20	50
WPIGSA-8	45	18:11.25:15.75	50
WPIGSA-9	40	10:16:14	50
WPIGSA-10	50	12.5:12.5:25	50

1- Dry powder ratio 2- Determined volume per film

همچنین فیلم‌هایی با نسبت وزنی ۱۲ : ۸ : ۲۰ = SA : G :WPI و نسبت وزنی ۱٤ : ۱٦ : ۱۰ = SA : G : WPI به ترتیب دارای کم‌ترین WVP و میزان عبوردهی نسبت به اکسیژن[5](OP) بودند. ضمن آن که تحلیل نتایج نشان داد که نسبت وزنی بهینه برای فیلم با خواص عملکردی خوب، ۵ : ۱۲ : ۸ = SA : G : WPI بود. خواص فیزیکی مکانیکی فیلم‌های مرکب مذکور در(جدول ۱۱) آورده شده است[۳۲].

۲-۵- فیلم‌های مرکب سه جزئی بر پایه پروتئین و بررسی خواص عملکردی آن‌ها

ونگ و همکاران[1](۲۰۱۰) فیلم‌های مرکب سه جزئی ایزوله پروتئین آب پنیر/ ژلاتین / آلژینات سدیم را به روش محلول تهیه کرده و خواص فیزیکی - مکانیکی آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند[۳۰، و ۳۱]. آن‌ها محلول آبی ٤٪ وزنی تشکیل‌دهنده فیلم پروتئین آب پنیر(WPI) همراه با گلیسیرین(با غلظت ۵۰٪ وزنی WPI)، محلول آبی ٤٪ وزنی تشکیل‌دهنده فیلم ژلاتین(G) همراه با گلیسیرین(با غلظت ۵۰٪ وزنی G) و محلول آبی ٤٪ وزنی تشکیل‌دهنده

2- Sodium alginate
3- Puncture strength
4- Tear sterength
5- Oxygen permeability

1- Wang et al

جدول ۱۱ – خواص مکانیکی و ممانعت‌کنندگی فیلم‌های مرکب WPI/ G / SA

Samples	TS (MPa)	E (%)	FT (N)	TT (N)	WVP (g mm/kPa d m²)	OP (cm³ µm/m² d kPa)
WPIGSA-1	10.77 ± 2.31	12.55 ± 3.19	11.56 ± 3.33	0.152 ± 0.003	48.04 ± 10.81	17.00 ± 3.33
WPIGSA-2	6.88 ± 1.01	17.25 ± 2.23	26.80 ± 6.58	0.154 ± 0.003	62.22 ± 6.55	40.00 ± 6.76
WPIGSA-3	7.58 ± 1.30	12.50 ± 1.33	24.37 ± 4.21	0.113 ± 0.001	64.26 ± 15.10	19.00 ± 5.31
WPIGSA-4	7.48 ± 1.90	18.55 ± 3.88	21.53 ± 8.09	0.138 ± 0.001	57.84 ± 5.11	16.00 ± 4.21
WPIGSA-5	7.09 ± 1.11	25.57 ± 0.77	29.54 ± 7.77	0.148 ± 0.002	88.22 ± 9.99	14.00 ± 2.99
WPIGSA-6	9.47 ± 1.54	29.42 ± 5.34	32.33 ± 6.90	0.122 ± 0.004	73.44 ± 11.24	14.00 ± 6.11
WPIGSA-7	6.05 ± 0.98	21.57 ± 3.05	28.14 ± 5.37	0.134 ± 0.002	75.82 ± 13.19	19.00 ± 2.67
WPIGSA-8	8.03 ± 0.93	20.96 ± 4.09	24.58 ± 4.56	0.108 ± 0.001	63.37 ± 14.62	22.00 ± 3.58
WPIGSA-9	9.20 ± 1.75	21.20 ± 5.84	32.83 ± 8.22	0.104 ± 0.002	67.83 ± 9.60	8.00 ± 1.91
WPIGSA-10	9.95 ± 1.22	26.66 ± 2.35	28.56 ± 4.15	0.119 ± 0.001	62.73 ± 14.37	31.00 ± 3.76

۳- نتیجه گیری

ترکیب پلی‌ساکاریدها(مانند نشاسته و مشتقات آن، ترکیبات سلولزی، کیتوزان ،صمغ و غیره) با پروتئین‌ها، غالباً باعث بهبود خواص عملکردی فیلم‌های بر پایه پروتئین‌ها می‌شود. تهیه فیلم‌های مرکب زیست تخریب‌پذیر بر پایه پروتئین‌ها با استفاده از مواد آبگریز مانند چربی‌ها و پلی‌لاکتیک اسید، موجب افزایش خاصیت ممانعت‌کنندگی در برابر نفوذ بخار آب فیلم‌های پروتئینی می‌شود. استفاده از مواد پرکننده و تقویت‌کننده در ساخت فیلم‌های مرکب بر پایه پروتئین‌ها، غالباً باعث افزایش استحکام کششی فیلم‌ها و کاهش انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌شود.

٤- منابع

1. Ou, S., Wang, Y., Tang, S., Huang, C. and Jackson, M. G., "Role of ferulic acid in preparing edible films from soy protein isolate", Journal of food engineering,70: 205- 210. 2005.
2. Arcan, I., Yemenicioglu, A., Incorporating phenolic compounds opens a new perspective to use zein films as flexible bioactive packaging materials. Food research international 44 , 550-556. 2011.
3. Audic, J.L., Chaufer, B., "Influence of plasticizers and crosslinking on the properties of biodegradable films made from sodium caseinate", European polymer journal 41, 1934 1942. 2005.
4. Jiang, J., Youling L., Xiong, Melissa, C., Newman, Gregg, K., Rentfrow, Structure – modifying
alkaline and acidic pH-shifting processes promote film formation of soy proteins. Food chemistry 132, 1944 1950. 2012.
5. Kowalczyk, D., Baraniak, B., "Effects of plasticizers, pH and heating of film-forming solution on the properties of pea protein isolate films", Journal of food engineering 105, 295 305. 2011.
6. Bertan, L. C., Tanada- Palmu, P. S., Siani, A. C. and Grosso, C. R. F., Effect of fatty acids and 'Brazilian elemi' on composite films based on gelatin. Food hydrocolloids 19:73 82. 2005.
7. Janjarasskul, T., Rauch, D.J., McCarthy, K.L., Krochta, J.M., Barrier and tensile properties of whey protein-candelilla wax film/sheet. LWT - Food science and technology xxx,1-6. 2013.
8. Jongjareonrak, A., Benjakul, S., Visessanguan, W., Tanaka, M., Fatty acids and their sucrose esters affect the properties of fish skin gelatin-based film. European food research and technology 222(5 6), 650 657. 2006b.
9. Sohail, S.S., Wang, B., Biswas, M.A.S., Oh, J.H., "Physical, morphological, and barrier properties of edible casein films with wax applications", Journal of food science 71(4), 255 259. 2006.
10. Anker, M., Berntsen, J., Hermansson, A.-M. and Stading, M., Improved water vapor barrier of whey protein films by addition of an acetylated monoglyceride. Innovative food science and

emerging technologies 3: 81 92. 2002.
11. González, A., Alvarez Igarzabal, C.I., Soy protein - Poly(lactic acid) bilayer films as biodegradable material for active food packaging. Food hydrocolloids 33, 289-296. 2013.
12. Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B., Sedaghat, N., "Physical properties of edible emulsified films based on pistachio globulin protein and fatty acids", Journal of food engineering 100, 102 108. 2010.
13. Galus, S., Mathieu, H., Lenart, A., Debeaufort, F., Effect of modified starch or maltodextrin incorporation on the barrier and mechanical properties, moisture sensitivity and appearance of soy protein isolate-based edible films. Innovative food science and emerging technologies 16, 148 154. 2012.
14. Osés, J., Fabregat-Vazquez, M., Pedroza-Islas, R., Tomas, S.A., Cruz-Orea, A., Maté, J.I., "Development and characterization of composite edible films based on whey protein isolate and mesquite gum", Journal of food engineering 92, 56 62. 2009.
15. Song, N.B., Song, H.Y., Jo, W.S., Song, K.B., "Physical properties of a composite film containing sunflower seed meal protein and its application in packaging smoked duck meat", Journal of food engineering 116, 789 795. 2013.
16. Zuo, M., Song, Y., Zheng, Q., "Preparation and properties of wheat gluten/methylcellulose binary blend film casting from aqueous ammonia: A comparison with compression molded composites", Journal of food engineering 91 ,415 422. 2009.
17. Cao, N., Fu, Y., He, J., Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. Food hydrocolloids 21, 1153 1162. 2007.
18. Ghanbarzadeh, B., Oromiehi, A.R., "Biodegradable biocomposite films based on whey protein and zein: Barrier, mechanical properties and AFM analysis". International journal of biological macromolecules 43, 209 215. 2008.
19. Damodaran, S., Amino acids, peptides, and proteins. In: Damodaran, S., Parkin, K.L., Fennema, O.R.(Eds.), Fennema's Food chemistry. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 217 329. 2008.
20. Pérez-Gago, M.B., Krochta, J.M., "Denaturation time and temperature effects on solubility, tensile properties, and oxygen permeability of whey protein edible films", Journal of food science 66(5), 705 710. 2001.
, 76 83. 2011.
21. Prodpran, T., Benjakul, S., Phatcharat,S., "Effect of phenolic compounds on protein cross-linking and properties of film from fish myofibrillar protein", International Journal of biological macromolecules 51 ,774 782. 2012.
22. Micard, V., Belamri, R., Morel, M.H., Guilbert, S., "Properties of chemically and physically treated wheat gluten films", Journal of Agricultural and food chemistry 48(7), 2948 2953. 2000.
23. Ercili-Cura, D., Partanen, R., Husband, F., Ridout, M., Macierzanka, A., Lille, M., Boer, H., Lantto, R., Buchert, J., Mackie, A.R., Enzymatic cross-linking of β-lactoglobulin in solution and at air–water interface: Structural constraints. Food hydrocolloids, Volume 28, Issue 1, Pages 1-9. 2012.
24. Jiang, Y., Tang, C.H., Wen, Q.B., Li, L., Yang, X.Q., Effect of processing parameters on the properties of transglutaminase-treated soy protein isolate films. Innovative Food science & emerging technologies, Volume 8, Issue 2, Pages 218-225. 2007.
25. Ouattara, B., Canh, L. T., Vachon, C., Mateescu, M.A. and Lacroix, M., Use of γ-irradiation cross-linking to improve the water vapor permeability and the chemical stability of milk

protein films. Radiation physics and chemistry 63: 821-825. 2002.
26. Shi, L., Zhou, J., Gunasekaran, S., 2008. Low temperature fabrication of ZnO–whey protein isolate nanocomposite. Materials letters 62(28), 4383 4385.
27. Sothornvit, R., Rhim, J.W., Hong, S.I., "Effect of nano-clay type on the physical and antimicrobial properties of whey protein isolate/clay composite films", Journal of food engineering 91, 468 473. 2009.
28. Zhou, J.J., Wang, S.Y., Gunasekaran, S., "Preparation and characterization of whey protein film incorporated with TiO2 nanoparticles", Journal of food science 74(7), N50 N56. 2009.
29. Pereda, M., Amica, G., Racz, I., Marcovich, N.E., Preparation and characterization of sodium caseinate films reinforced with cellulose derivative. Carbohydrate 86 , 1014 1021. 2011.
30. Wang, L., Auty, M.A.E., Kerry, J.P., "Physical assessment of composite biodegradable films manufactured using whey protein isolate, gelatin and sodium alginate", Journal of food engineering 96, 199 207. 2010
31. Pereda, M., Amica, G., Racz, I., Marcovich, N.E., "Structure and properties of nanocomposite films based on sodium caseinate and nanocellulose fibers", Journal of food engineering 103
32. Ustunol, Z., Mert, B., "Water solubility, mechanical, barrier, and thermal properties of cross-linked whey protein isolate-based films", Journal of food science 69(3), FEP129 FEP133. 2004.

آدرس نویسنده

مشهد - کیلومتر ۱۲ بزرگراه آسیایی مشهد - قوچان- مقابل شیر پاستوریزه پگاه - پژوهشکده علوم و صنایع غذایی.