

The Simultaneous Effect of Impact Modifier and Calcium Carbonate on UPVC Profile Mechanical Properties

Negin Moallemi Khiavi^{1*}, Ata Tavkkoli Aval²

¹ Plastic Technology Institute, Roozwin Industrial Complex, Ardabil, Iran.

² Roozwin Industrial Complex, Ardabil, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: February 18, 2026

Revised: March 08, 2026

Accepted: April 21, 2026

ePublished: July 26, 2026

ABSTRACT

This research experimentally evaluated the mechanical performance of UPVC door and window profiles produced using three industrial formulations designated TF-01, TF-02, and TF-03, which contain varying amounts of ACR and CPE impact modifiers, as well as Calcium Carbonate (CaCO_3). A comprehensive series of standard tests, including flexural modulus, tensile impact strength, material and profile Charpy impact strength, falling-weight impact test, and compression and tensile stress tests on welded corner joints, were conducted in accordance with the Iranian National Standard INSO 12291-1 and corresponding international standards, at the Plastics Technology Institute of the Roozwin Industrial Complex.

The results clearly demonstrate that the TF-03 formulation, characterized by the optimized balance of ACR and a reduced CaCO_3 content from “36Phr” (in TF-01) to “29Phr”, yielded significant performance improvements. Specifically, TF-03 achieved a maximum tensile impact strength of “683 kJ/m^2 ”, substantially higher than the “297 kJ/m^2 ” recorded for TF-01. Furthermore, its profile Charpy impact strength reached “51 kJ/m^2 ”, surpassing the minimum standard requirement ($\geq$ “45 kJ/m^2 ”), while TF-01 only reached “30.8 kJ/m^2 ”. Additionally, the falling-weight impact tests indicated that all three formulations exhibited satisfactory performance (zero failures in ten applied impacts). It can be stated that the reduction of Calcium Carbonate concentration to “29Phr”, by mitigating stress concentration, was a key factor enabling TF-03 to attain the highest toughness and achieve full compliance with the standard’s impact requirements.

Keywords: UPVC profile, impact modifier, charpy impact test, flexural modulus, tensile impact strength

How to cite this article

Moallemi Khiavi N, Tavkkoli Aval A, The Simultaneous Effect of Impact Modifier and Calcium Carbonate on UPVC Profile Mechanical Properties. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(10):757-768.

*Corresponding author’s email: negin.moallemi93@gmail.com

*Corresponding ORCID ID: [0009-0007-1390-7612](https://orcid.org/0009-0007-1390-7612)



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



تأثیر همزمان بهبوددهنده ضربه و کربنات کلسیم روی خواص مکانیکی پروفیل‌های UPVC

نگین معلمی خیاوی^{۱*}، عطا توکلی اول^۲

^۱مدیر انستیتو تکنولوژی پلاستیک روزوین، مجتمع صنعتی روزوین، اردبیل
^۲مدیرعامل مجتمع صنعتی روزوین، مجتمع صنعتی روزوین، اردبیل

چکیده

در این پژوهش، عملکرد مکانیکی پروفیل‌های یو پی وی سی درب و پنجره تولیدشده با سه فرمولاسیون صنعتی با کدهای TF-01، TF-02 و TF-03 که حاوی مقادیر متفاوتی از بهبوددهنده‌های ضربه ACR و CPE و کربنات کلسیم هستند، به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمون‌های استاندارد شامل مدول خمشی، مقاومت ضربه کششی، مقاومت ضربه چارپی ماده و پروفیل، آزمون ضربه سقوط آزاد جسم و همچنین تنش خمش فشاری و کششی گوشه‌های جوش شده پروفیل‌ها مطابق با استاندارد ملی 12291-1 INSO و استانداردهای بین‌المللی متناظر، در انستیتو تکنولوژی پلاستیک مجتمع صنعتی روزوین انجام گرفته است. نتایج به وضوح نشان می‌دهند که فرمولاسیون TF-03، که با توازن بهینه ACR و میزان کاهش‌یافته CaCO_3 از ۳۶ Phr (در TF-01) به ۲۹ Phr مشخص می‌شود، بهبود عملکردی چشم‌گیری داشته است. به طور خاص، TF-03 به حداکثر مقاومت ضربه کششی 683 kJ/m^2 دست یافت که به مراتب بالاتر از مقدار 297 kJ/m^2 ثبت شده برای TF-01 بود. علاوه بر این، مقاومت ضربه چارپی پروفیل آن به 51 kJ/m^2 رسید و از حداقل الزامات استاندارد (45 kJ/m^2) فراتر رفت، در حالی که TF-01 تنها به $30/8 \text{ kJ/m}^2$ دست یافت. همچنین، آزمون‌های ضربه وزنه سقوط نشان داد که هر سه فرمولاسیون عملکرد رضایت‌بخشی (بدون شکست در ده ضربه اعمالی) از خود بروز دادند. می‌توان اظهار داشت، کاهش غلظت کربنات کلسیم به ۲۹ Phr، با کاهش تمرکز تنش، یکی از عامل‌های عامل کلیدی در دستیابی TF-03 به بالاترین چقرمگی و انطباق کامل با الزامات ضربه‌ای استاندارد بوده است.

کلیدواژه‌ها: پروفیل UPVC، بهبوددهنده ضربه، آزمون ضربه چارپی، خواص مکانیکی، مدول خمشی، مقاومت ضربه کششی

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴

نحوه ارجاع به این مقاله

معلمی خیاوی نگین، توکلی اول عطا. تأثیر همزمان بهبوددهنده ضربه و کربنات کلسیم روی خواص مکانیکی پروفیل‌های UPVC، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۶۸-۷۵۷: ۲۶(۱۰): ۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: negin.moallemi93@gmail.com

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0009-0007-1390-7612



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، پروفیل‌های ساخته‌شده از پلی‌وینیل کلراید سخت (UPVC) به‌عنوان جایگزینی مناسب برای پروفیل‌های فلزی و چوبی در صنعت درب و پنجره معرفی شده‌اند. مقاومت بالا در برابر خوردگی، خواص عایق حرارتی و صوتی مطلوب، قیمت مناسب، قابلیت بازیافت، و نگهداری آسان از جمله مزایای اصلی این پروفیل‌ها به‌شمار می‌روند. با این حال، پی‌وی.سی خالص دارای محدودیت‌هایی نظیر شکنندگی در دماهای پایین و حساسیت به شرایط فرآیندی است که سبب شده استفاده از افزودنی‌ها در فرمولاسیون آن به یک ضرورت فنی تبدیل شود.

جهت بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی، حرارتی و فرآیندی پروفیل‌های پی‌وی.سی (UPVC)، انواع مختلفی از افزودنی‌ها مانند کمک فرآیندها (Processing Aids) پایدارکننده‌های حرارتی، مستریج‌های رنگی، پرکننده‌هایی نظیر کرنات کلسیم، و اصلاح‌کننده‌های ضربه مانند کلروپلی‌اتیلن و آکریلیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این افزودنی‌ها با کنترل ویسکوزیته مذاب، افزایش مقاومت به ضربه، بهبود پایداری حرارتی و کاهش هزینه‌های تمام‌شده، نقش حیاتی در تولید پروفیل‌هایی مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، بررسی تأثیر افزودنی‌های اصلاح‌کننده ضربه و پرکننده‌های معدنی بر خواص مکانیکی و حرارتی ترکیبات پی‌وی.سی (UPVC) به‌طور گسترده موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. حسینی کاخک و همکاران [1]، اثر اصلاح‌کننده‌های ضربه‌ای حاوی آکریلیک (ACR)، روی مدول الاستیسیته، دمای تغییر شکل حرارتی و مقاومت ضربه PVC موردبررسی قراردادند و نتایج فراگیر برای فرمولاسیون‌های صنعتی قابل کاربرد ارائه نمودند. لیو و همکاران [2]، اثر نسبت‌های مختلف کرنات کلسیم (CaCO_3) بر نحوه توزیع تنش و نحوه گسترش ترک در ماتریس PVC را موردبررسی قراردادند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش میزان کرنات کلسیم، به دلیل تفاوت در مدول الاستیسیته، تمرکز تنش در نواحی مرزی ذرات افزایش‌یافته و احتمال بروز ترک و شکست ترد در نمونه‌ها بیشتر می‌شود. این یافته‌ها درک عمیق‌تری از نحوه تعامل پرکننده‌های معدنی با ساختار پلیمری ارائه داده و می‌تواند در طراحی بهینه‌ی فرمولاسیون‌های UPVC برای کاربردهای ساختمانی با نیازهای مکانیکی خاص، مورد استفاده قرارگیرد. لیو و پن [3]، با بهره‌گیری از روش‌های شبیه‌سازی عددی، اثر نسبت‌های مختلف کرنات کلسیم بر خواص کامپاندهای PVC-ACR را بررسی کرده و نشان دادند که افزایش کرنات کلسیم تا حدود مشخصی موجب بهبود مدول الاستیسیته می‌شود، ولی درعین حال مقاومت به ضربه به دلیل افزایش تردی ساختار، کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [4]، با ایجاد شبکه‌ای از ذرات پلی‌اتیلن کلرینه شده (CPE) در ماتریس پی‌وی.سی (PVC)، نشان دادند که این ساختار باعث بهبود چشمگیر مقاومت به ضربه و پایداری حرارتی کامپاند نهایی می‌شود. جیانگ و همکاران [5]، نشان داده‌اند که اصلاح سطحی ذرات کرنات کلسیم می‌تواند سازگاری بین پرکننده و ماتریس پی‌وی.سی (PVC) را به‌طور قابل‌توجهی بهبود دهد. این امر منجر به توزیع یکنواخت‌تر ذرات، کاهش تمرکز تنش و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی، به‌ویژه مقاومت ضربه

و استحکام کامپوزیت‌های PVC، می‌شود و همچنین فرآیندپذیری ماده را بهبود می‌بخشد.

جوشی و ماراس [6] در یک پژوهش تجربی، خواص مکانیکی PVC اصلاح‌شده با افزودنی‌های ضربه را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از افزودنی‌های معدنی می‌تواند در کنار افزایش مدول خمشی، خواص ضربه‌ای را نیز تا حدودی بهبود ببخشد. بررسی‌های تجربی توسط چن و همکاران [7] نشان داد که افزودن کرنات کلسیم در مقیاس میکرو و نانو به پی‌وی.سی می‌تواند باعث تغییرات قابل‌توجهی در خواص ذوب، خواص حرارتی و مکانیکی شود، به‌گونه‌ای که اندازه و توزیع ذرات نقش کلیدی در بهبود مدول، سختی و مقاومت ضربه ایفا می‌کنند، که این یافته‌ها برای فرمولاسیون پی‌وی.سی (UPVC) با پرکننده معدنی نیز قابل‌توجه است. یو و همکاران [8] نشان دادند که استفاده هم‌زمان از اصلاح‌کننده‌های ضربه‌ای ACR و CPE، در صورتی که توزیع یکنواختی در ماتریس PVC داشته و برهم‌کنش هم‌افزا بین فازها برقرار شود، می‌تواند اثر سینرژیک قابل‌توجهی در بهبود خواص ضربه‌ای ایجاد کند؛ به‌گونه‌ای که توازن مطلوبی میان سختی و چقرمگی، به‌ویژه برای کاربردهای ساختمانی، حاصل می‌شود. از سوی دیگر، گئورمازی و همکاران [9] نیز با بررسی افزودن کرنات کلسیم در شرایط آب‌وهوایی مختلف، گزارش کردند که پرکننده‌های معدنی در کنار بهبود هزینه تولید، اثر منفی بر مقاومت به ضربه دارند و باید به‌دقت مقدار آن‌ها کنترل شود. فرناندز و آگوپیان [10] نیز با بررسی اثر ترکیب پی‌وی.سی (UPVC) در پروفیل‌های در معرض هوا، نتیجه گرفتند که ترکیب دقیق اصلاح‌کننده‌ها نقش مهمی در پایداری بلندمدت خواص مکانیکی این پروفیل‌ها دارد. با وجود پژوهش‌های متعدد درباره بهبود خواص مکانیکی پلی‌وینیل کلراید (PVC)، بیشتر پژوهش‌ها اثر افزودنی‌ها مانند اصلاح‌کننده‌های ضربه یا فیلرهای معدنی را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند. به‌ویژه، بررسی اثرات هم‌افزایانه میان اصلاح‌کننده‌های ضربه آکریلیک (ACR) و پلی‌اتیلن کلرینه شده (CPE) در حضور مقادیر مختلف کرنات کلسیم (CaCO_3) در فرمولاسیون‌های پی‌وی.سی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، نسبت فیلرهای معدنی و اصلاح‌کننده‌های ضربه می‌تواند به‌طور مستقیم بر توزیع تنش، رفتار شکست و چقرمگی نهایی پروفیل‌های پی‌وی.سی تأثیر بگذارد، در حالی که بسیاری از مطالعات موجود عمدتاً بر نمونه‌های آزمایشگاهی متمرکز بوده و عملکرد پروفیل‌های اکستروودی واقعی را کمتر بررسی کرده‌اند. بر این اساس، هدف از این پژوهش بررسی و بهینه‌سازی هم‌زمان مقدار کرنات کلسیم و اصلاح‌کننده‌های ضربه (ACR/CPE) در یک فرمولاسیون واحد پی‌وی.سی به‌منظور افزایش چقرمگی، کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد مکانیکی پروفیل‌های اکستروودی، به‌ویژه در کاربردهای ساختمانی است.

در این راستا، سه فرمولاسیون آزمایشی با نام‌های TF-01، TF-02 و TF-03 در انستیتو تکنولوژی پلاستیک مجتمع صنعتی روزوین توسعه داده شده که هر یک حاوی مقادیر متفاوتی از CPE، ACR و کرنات کلسیم هستند. برای ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون‌های ضربه چارپی مواد، ضربه چارپی پروفیل، ضربه کششی و مقاومت به ضربه سقوط آزاد جسم مطابق با استاندارد INSO 12291-1 [11] استفاده گردید. نتایج این آزمون‌ها امکان مقایسه

- پلی اتیلن کلرینه شده (CPE): یک الاستومر نیمه بلورین با سازگاری نسبی با زنجیره‌های PVC است که در فاز پراکنده، انرژی ضربه را جذب می‌کند. این افزودنی عموماً مقاومت ضربه‌ای را افزایش می‌دهد اما گاهی موجب کاهش مدول خمشی و شفافیت می‌شود [۱۳].

- پلیمرهای آکریلیکی (ACR): خانواده‌ای از پلیمرهای آمورف با ساختار هسته-پوسته که عملکرد موثرتری در جذب انرژی ضربه دارند. این اصلاح‌کننده‌ها معمولاً خواص مکانیکی را بدون افت محسوس در دیگر ویژگی‌ها، بهبود داده و از نظر پایداری حرارتی عملکرد بهتری نسبت به CPE دارند [۱۴]. از سوی دیگر، بهبود مقاومت ضربه در ترکیبات PVC با استفاده از اصلاح‌کننده‌های هسته-پوسته بر پایه سیلیکون-اکریلات نوین، به عنوان راهکاری مؤثر برای دستیابی به جذب انرژی ضربه بالاتر نیز مورد تأیید قرار گرفته است [۱۵].

از سوی دیگر کربنات کلسیم (CaCO_3) در این فرمولاسیون‌ها به‌عنوان یک پرکننده معدنی ارزان‌قیمت، باهدف بهبود سختی و کاهش قیمت تمام‌شده استفاده شده است. اما مقدار و اندازه ذرات آن تأثیر مستقیم بر خواص نهایی دارد. ذرات با اندازه بزرگ‌تر ممکن است باعث تمرکز تنش و کاهش خواص ضربه‌ای شوند، درحالی‌که ذرات ریزتر می‌توانند تا حدی انرژی شکست را افزایش دهند. ترکیب مقدار این سه مؤلفه، یعنی ACR، CPE و CaCO_3 ، تعیین‌کننده تعادل بین استحکام، سختی، فرآیندپذیری، مقاومت حرارتی و قیمت نهایی محصول است [۱۶]. افزودنی‌های دیگری نظیر پایدارکننده حرارتی، روان‌ساز داخلی و خارجی، کمک فرایند و تیتانیوم دی‌اکسید نیز مطابق فرمولاسیون پایه، ثابت نگه‌داشته شده‌اند. درصد وزنی بهبوددهنده‌های و همچنین کربنات کلسیم مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱ ترکیب درصدی افزودنی‌های اصلی در سه فرمولاسیون آزمایشی
Table1 percentage composition of the main additives in the experimental formulations

Formulation	ACR (Phr)	CPE(Phr)	CaCO_3 (Phr)
TF-01	4.67	2.67	36
TF-02	6.67	0	33.3
TF-03	7.33	0	29

مشخصات دقیق مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش به همراه شرکت‌های تامین‌کننده آنها در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲. مشخصات دقیق و منابع مواد اولیه مورد استفاده
Table2 Detailed Specifications and Sources of Raw Materials Used

Material	Grage/Type	Supplier	Country of Origin
PVC	S6558	Bandar Imam Petrochemical Iran	Iran
ACR	ACRYLAN 6D	Hampar	Iran
CPE	R135	Rike	China
CaCO_3	95T	Omiya Pars	Iran

۲-۲. فرایند اختلاط و اکستروژن

پس از توزین دقیق مواد اولیه مطابق فرمولاسیون‌های جدول ۱، عملیات پیش‌اختلاط در میکسر گرم- سرد آزمایشگاهی انجام شد. در مرحله اول، پودر پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پایدارکننده حرارتی و بهبوددهنده‌های ضربه، در میکسر گرم با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه (RPM) مخلوط گردیدند؛ این عمل به منظور اطمینان از جذب اولیه

تأثیر فرمولاسیون‌های مختلف بر عملکرد نهایی کامپاندهای UPVC را فراهم می‌کند.

باوجود پژوهش‌های انجام‌یافته، هنوز بررسی هم‌زمان اثرات مقادیر متفاوت آکریلیک (ACR)، پلی‌اتیلن کلرینه شده (CPE) و کربنات کلسیم در یک فرمولاسیون واحد یو پی وی سی به‌طور جامع انجام‌نشده است. در کاربردهای ساختمانی که مقاومت در برابر ضربه و استحکام اتصالات از الزامات اساسی به شمار می‌روند، نقش کلیدی بهبوددهنده‌های ضربه و کربنات کلسیم پررنگ‌تر می‌شود. بنابراین هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر ترکیب‌های مختلف افزودنی‌های مذکور بر خواص مکانیکی کامپاند UPVC است. در این راستا، سه فرمولاسیون آزمایشی با نام‌های TF-01، TF-02 و TF-03 در انستیتو تکنولوژی پلاستیک مجتمع صنعتی روزوین توسعه داده شده که هر یک حاوی مقادیر متفاوتی از ACR، CPE و کربنات کلسیم هستند. برای ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون‌های ضربه چارپی مواد، ضربه چارپی پروفیل، ضربه کششی و مقاومت به ضربه سقوط آزاد جسم مطابق با استاندارد INSO 12291-1 [۱۱] استفاده گردید. نتایج این آزمون‌ها امکان مقایسه تأثیر فرمولاسیون‌های مختلف بر عملکرد نهایی کامپاندهای UPVC را فراهم می‌کند.

۲- متدولوژی

۲-۱- مواد اولیه و فرمولاسیون‌ها

پلی‌وینیل کلراید (PVC) به‌صورت طبیعی شکننده است و برای استفاده در کاربردهای ساختمانی که نیاز به مقاومت ضربه‌ای، دوام حرارتی و فرآیندپذیری بالا دارند، لازم است با افزودنی‌های خاصی بهبود یابد [۱۲]. برای تضمین عملکرد بلندمدت پروفیل‌های یو پی وی سی، حفظ خواص مکانیکی حیاتی مانند چقرمگی (Toughness) در برابر بارهای ضربه‌ای ضروری است. چقرمگی، که معیاری از توانایی ماده برای جذب انرژی تا لحظه شکست نهایی است، به شدت تحت تأثیر ساختار میکروسکوپی و توزیع اجزای کامپوزیت قرار می‌گیرد [۱۲]. افزودن پرکننده‌های معدنی، مانند کربنات کلسیم، روشی مرسوم برای کاهش هزینه‌ها و افزایش سختی است. با این حال، این افزودنی‌ها ذاتاً دارای مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به ماتریس پلیمری هستند. تفاوت مدول بالا بین پرکننده و پلیمر، منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش (Stress Concentration Points) در مرزهای بین فازی (Interfacial Regions) می‌شود [۱۲]. در این نقاط تمرکز، انرژی کمتری برای شروع و گسترش میکروتُرک‌ها لازم است که نتیجه مستقیم آن کاهش چشم‌گیر در چقرمگی کلی ماده است. با توجه به این چالش مکانیکی، تمرکز اصلی در این پژوهش بر بررسی تأثیر بهبوددهنده‌های ضربه ACR و CPE و مقدار کربنات کلسیم بر خواص نهایی پروفیل‌های یو پی وی سی قرار گرفت. برای این منظور، سه فرمولاسیون متفاوت از ترکیب UPVC با نام‌های TF-01، TF-02 و TF-03 طراحی و در واحد آزمایشگاهی انستیتو تکنولوژی پلاستیک مجتمع صنعتی روزوین تهیه گردید. در این مطالعه، دو نوع رایج از بهبوددهنده‌های ضربه استفاده شده است:



شکل ۱ نحوه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای

Fig. 1 The procedure of three Point Bending Test

برای محاسبه مدول الاستیسیته خمشی باید مقادیر دو نیروی F_1 و F_2 از نمایشگر دستگاه کشش یونیورسال ثبت شوند که به ترتیب متناظر با دو کرنش خمشی $\epsilon_{f1} = 0.0005$ و $\epsilon_{f2} = 0.0025$ آزمون‌ها می‌باشند. در مرحله بعدی دو تنش خمشی σ_{f1} و σ_{f2} متناظر با کرنش‌های خمشی ذکر شده، طبق رابطه (۱) بر حسب مگاپاسکال محاسبه می‌گردند:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

که F میزان نیروی وارد شده است که از نمایشگر دستگاه کشش یونیورسال قابل مشاهده است. همچنین L ، فاصله دو تکیه‌گاه، h ضخامت آزمون و b عرض آزمون است. در نهایت مدول الاستیسیته خمشی (E_f) از رابطه (۲) برای هر کدام از آزمون‌ها محاسبه می‌گردد:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1}} \quad (2)$$

مطابق با استاندارد مرجع [۱۷]، میانگین مدول الاستیسیته خمشی باید بزرگ‌تر یا مساوی 2200 N/mm^2 بوده و مقادیر منفرد نیز باید بزرگ‌تر یا مساوی 2000 N/mm^2 باشد.

۳-۳-۲- آزمون مقاومت ضربه چارپی (ماده و پروفیل)

به منظور ارزیابی مقاومت ضربه‌ای ماده و پروفیل در برابر بارگذاری ناگهانی، دو نوع آزمون ضربه چارپی ماده و پروفیل، مطابق با استاندارد بین‌المللی ISO 179-1 [۱۹] و استاندارد ملی INSO 9277-1 [۲۰] انجام شد. برای انجام آزمون چارپی پروفیل تعداد ۱۰ آزمون مستطیلی شکل با ابعاد $50 \times 6 \times h \text{ mm}$ و برای آزمون چارپی مواد تعداد ۱۰ آزمون مستطیلی شکل با ابعاد $80 \times 10 \times h \text{ mm}$ آماده می‌شوند که h ضخامت دیواره اصلی پروفیل است. جهت ضربه برای هر دو نوع آزمون چارپی از نوع تخت است به طوری که جهت وارد آمدن ضربه، موازی با ضخامت آزمون‌ها، h ، است و ضربه به سطح پهن طولی آزمون $(b \times h)$ وارد می‌شود. هر دو آزمون چارپی پروفیل و مواد، با آزمون‌های دارای دو شکاف انجام می‌گیرد با این تفاوت که شکاف آزمون چارپی پروفیل از نوع 1FC و شکاف آزمون چارپی مواد از

پایدارکننده انجام شد. در مرحله دوم، سایر افزودنی‌ها شامل روان‌کننده‌ها، کربنات کلسیم (CaCO_3) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) اضافه شدند و عملیات اختلاط تا رسیدن به دمای 130°C درجه سانتی‌گراد ادامه یافت. پس از اختلاط کامل، مخلوط به مخزن سرد انتقال یافت تا ضمن ادامه فرایند اختلاط با دور 250 دور بر دقیقه، دمای آن به 40°C درجه سلسیوس برسد. این مرحله باعث توزیع یکنواخت افزودنی‌ها در ماتریس پودری و افزایش همگنی ترکیب می‌شود. پس از اختلاط، پودرهای آماده‌شده برای فرایند اکستروژن مورد استفاده قرار گرفتند.

پروفیل موردنظر از نوع لنگه پنجره UPVC از کلاس B مطابق استاندارد ملی [۱۷] بود که قالب استاندارد آن در خط تولید فراهم بود، شایان ذکر است که در پروفیل‌های کلاس B دیواره‌های اصلی دارای ضخامت بین $2/5$ تا $2/8$ میلی‌متر هستند. دمای مناطق حرارتی اکستروژر به ترتیب در پنج ناحیه بین 165 تا 180°C درجه سلسیوس تنظیم شد و دمای قالب‌ها نیز روی 185 تا 200°C درجه سلسیوس (بر اساس تجربه صنعتی) تنظیم گردید. برای حفظ ثبات دمایی، کل مسیر توسط سیستم کنترل حلقه بسته با ترموکوپل‌های دقیق مانیتور می‌شود. پروفیل‌های اکستروژر شده پس از خروج از قالب، وارد کالیبراتور خلأ و تانک خنک‌کننده شده و با عبور از سیستم کشش و سیستم برش، شاخه‌های 6 متری از پروفیل موردنظر برای انجام آزمون‌های استاندارد آماده‌سازی شدند. تمام نمونه‌ها در شرایط یکسان تولید و به مدت 72 ساعت در دمای اتاق برای رسیدن به تعادل تنش‌ی نگهداری شدند.

۲-۳- روش انجام آزمون‌های ارزیابی خواص مکانیکی

در این پژوهش، به منظور بررسی و مقایسه عملکرد مکانیکی پروفیل‌های یو پی وی سی درب و پنجره تولیدشده با سه فرمولاسیون صنعتی مختلف، مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد مطابق با استانداردهای ملی ایران و استانداردهای بین‌المللی معتبر انجام شده است که شامل آزمون‌های مدول الاستیسیته خمشی، آزمون مقاومت ضربه چارپی (پروفیل و مواد)، آزمون مقاومت ضربه کششی، آزمون خمش کششی و فشاری گوشه‌های جوش شده و آزمون ضربه سقوط آزاد جسم است. کلیه نمونه‌ها از خطوط تولید مجتمع صنعتی روزین تهیه شده و آزمون‌ها در شرایط یکنواخت و کنترل‌شده آزمایشگاهی در انستیتو تکنولوژی پلاستیک مجتمع صنعتی روزین انجام گرفته است. در ادامه نحوه انجام هر کدام از آزمون‌های مذکور بصورت مجزا شرح داده شده است.

۲-۳-۱- آزمون مدول الاستیسیته خمشی (خمش سه نقطه‌ای)

به منظور تعیین سختی خمشی و رفتار الاستیک پروفیل‌ها، آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ISO 178 [۱۷] و استاندارد ملی متناظر INSO 357 [۱۸] انجام شد. در این آزمون، تعداد پنج آزمون مکعب مستطیلی شکل با ابعاد $80 \times 25 \times h$ میلی‌متر، (h ضخامت دیواره اصلی پروفیل است)، روی دو تکیه‌گاه در دستگاه کشش یونیورسال قرار گرفته و نیروی خمشی با سرعت ثابت توسط فک مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای اعمال می‌شود. نحوه انجام تست خمش سه نقطه‌ای در انستیتو تکنولوژی پلاستیک روزین در شکل ۱ نشان داده شده است.

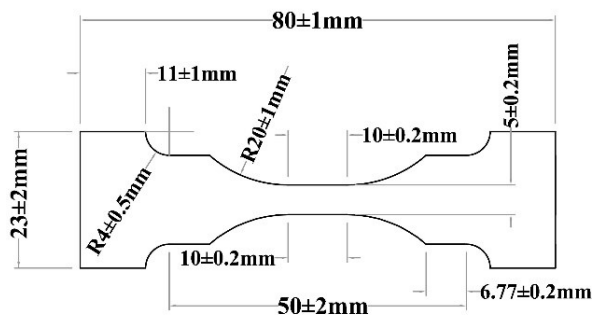
است. شایان ذکر است که پروفیل مورد استفاده برای انجام این آزمون از نوع B مطابق با جدول ۳ است.

جدول ۳ مقادیر مجاز برای مقادیر منفرد و میانگین مقاومت در برابر ضربه چارپی برای پروفیل‌های نوع A و B [۱۱]

Test	Profile Type	Wall Thickness (mm)	Individual (kJ/m ²)	Average (kJ/m ²)
Charpy (Profile)	A	≥ 2.8	≥ 40	≥ 20
	B	≥ 2.5 & ≤ 2.8	≥ 45	≥ 25
Charpy (Material)	A	≥ 2.8	-	≥ 55
	B	2.5 ≤ 2.8	-	≥ 60

۳-۳- آزمون مقاومت ضربه کششی

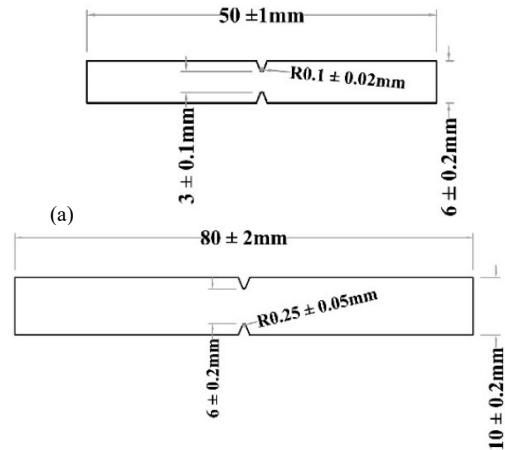
آزمون ضربه کششی به منظور بررسی رفتار دینامیکی ماده تحت تنش کششی ناگهانی و مطابق با استاندارد ISO 8256 [۲۱] و استاندارد ملی ISIRI 10919 [۲۲] اجرا گردید. در این آزمون، انرژی لازم برای ایجاد شکست در نمونه اندازه‌گیری شده و نتایج به صورت انرژی ضربه‌ای بر واحد سطح گزارش می‌شود. برای انجام این آزمون، تعداد ده عدد آزمون از آزمون نوع پنج مطابق با استاندارد INSO 12291-1 [۱۱] تهیه می‌شوند، ابعاد آزمون نوع ۵، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ شماتیک آزمون مورد استفاده برای آزمون ضربه کششی
Fig. 4 Schematic of the specimen of the tensile impact test

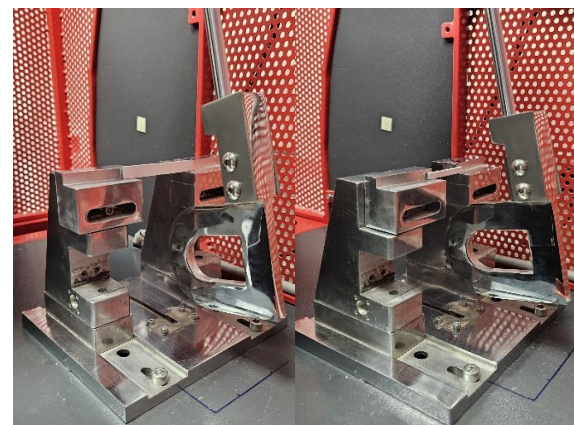
برای انجام آزمایش مطابق با روش (الف) استاندارد ISIRI 10919 [۲۲] یکسر نمونه درون فک و سر دیگر نمونه داخل کنگی متقاطع دستگاه آزمون قرار می‌گیرد، نحوه قرارگیری آزمون در دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است.

نوع 1FA است، شعاع شکاف 1FC برابر $r_N = 0.1 \text{ mm} \pm 0.02 \text{ mm}$ و شعاع شکاف 1FA برابر $r_N = 0.25 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ می‌باشد، شکل شماتیک آزمون‌های مورد استفاده برای آزمون چارپی پروفیل و ماده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ شماتیک آزمون‌های مورد استفاده در آزمون‌های (a) چارپی پروفیل، (b) چارپی ماده
Fig. 2 Schematic of the two type charpy test specimens (a) Profile, (b) Material

نحوه انجام آزمون چارپی در انستیتو تکنولوژی پلاستیک روزوین در شکل ۳ نشان داده شده است.

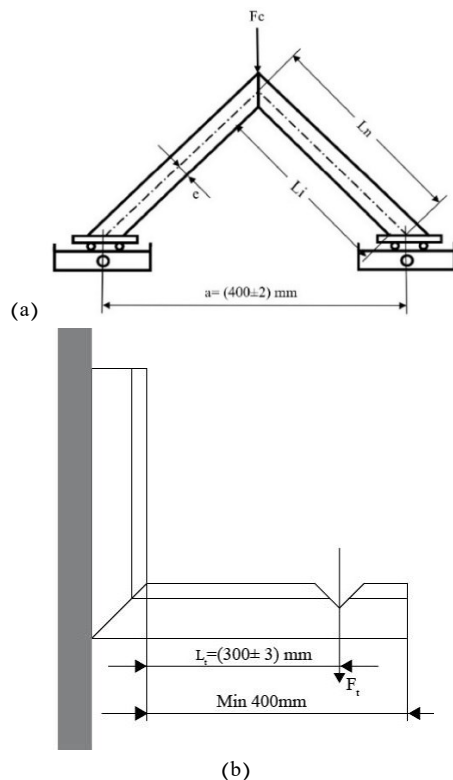


شکل ۳ نحوه انجام آزمون چارپی (a) پروفیل و (b) ماده
Fig. 3 The procedure of Charpy Strength test (a) Profile and (b) Material

مقاومت ضربه چارپی برای آزمون‌های شکافدار (a_{cN}) از طریق رابطه (۳) بر حسب کیلوژول بر مترمربع محاسبه می‌شود:

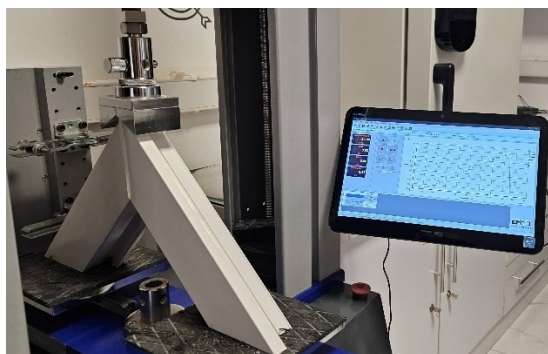
$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \times 10^3 \quad (3)$$

که در آن E_c ، انرژی جذب شده تصحیح شده شکست بر حسب ژول (J) است، که از روی نمایشگر دستگاه آزمون ضربه برای هر آزمون ثبت می‌شود، h ضخامت آزمون بر حسب میلی‌متر و b_N عرض باقی‌مانده بین دو شکاف بر حسب میلی‌متر می‌باشد. مقادیر مجاز برای آزمون‌های چارپی پروفیل و مواد در جدول ۳ درج شده



شکل ۶ شماتیک آزمون‌های مورد استفاده در آزمون‌های خمش فشاری و کششی گوشه‌های جوش شده

Fig. 6 Schematic of specimens of the compression and tensile bending test



شکل ۷ نحوه انجام آزمون خمشی گوشه‌های جوش شده

Fig. 7 The procedure of Compression bending test for welded corners

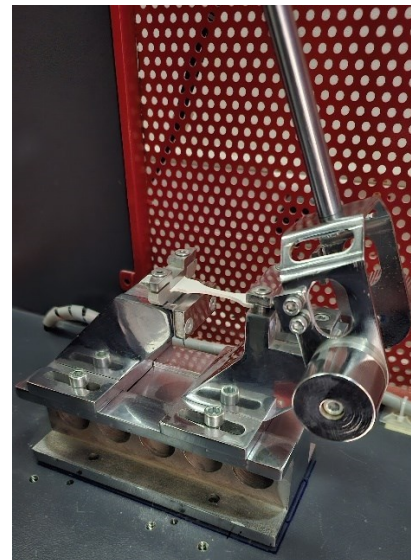
در این آزمون، بار تا لحظه شکست اعمال شده و بیشینه نیروی تحمل شده به عنوان معیار عملکرد مکانیکی ناحیه جوش شده گزارش می‌گردد. شایان ذکر است که مقادیر تنش خمشی (σ_c) و کششی (σ_t) با توجه به شکل سطح مقطع، ممان اینرسی (I)، مدول مقاومت (ω) و ماکزیمم فاصله از تار خنثی (e) و طبق روابط (۵) و (۷) محاسبه می‌شوند [۲۳-۲۴]:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{2} \times \left(\frac{a}{2} - \frac{e}{\sqrt{2}} \right) / \omega \quad (5)$$

که ω مدول مقاومت است که طبق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$\omega = I / e \quad (6)$$

که I ممان اینرسی سطح مقطع پروفیل و e ماکزیمم فاصله از تار خنثی می‌باشد.



شکل ۵ نحوه انجام آزمون ضربه کششی

Fig. 5 The procedure of tensile impact Strength test

پس از قرارگیری آزمون، پاندول رها شده و انرژی جذب شده (E_s) توسط نمونه ثبت می‌گردد، در صورت نیاز انرژی جذب شده توسط آزمون باید تصحیح گردد [۲۲]. در نهایت مقاومت ضربه کششی a_{tU} ، بر حسب کیلوژول بر مترمربع از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$a_{tU} = \frac{E_c}{h \times x} \times 10^3 \quad (4)$$

که در آن E_c انرژی ضربه تصحیح یافته بر حسب ژول (J)، h ضخامت آزمون و x عرض قسمت باریک آزمون بر حسب میلی‌متر است. مقادیر قابل قبول برای مقاومت ضربه کششی پروفیل‌های UPVC مطابق با استانداردهای مرجع در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴ محدوده مجاز برای مقادیر منفرد و میانگین مقاومت ضربه کششی [۱۱]

Table 4 Permissible limits for individual and mean values of tensile impact strength [11]

Test	Individual (kJ/m ²)	Average (kJ/m ²)
Tensile impact strength	≥ 450	≥ 600

۴-۳- آزمون خمشی گوشه‌های جوش شده

برای ارزیابی کیفیت جوش و استحکام اتصالات گوشه‌ای پروفیل‌ها، آزمون‌های تنش خمش فشاری و خمش کششی گوشه‌های جوش شده انجام شد. سه عدد آزمون برای هر یک از آزمون‌های خمش فشاری و خمش کششی که در واقع گوشه جوش شده با زاویه (90 ± 1) درجه هستند، مطابق با استاندارد ملی ISIRI 10930 [۲۳] و استاندارد اروپایی BS EN 514 [۲۴] آماده‌سازی می‌شوند. شماتیک آزمون‌های مورد استفاده در آزمون خمش کششی و فشاری در شکل ۶ نشان داده شده است.

نحوه قرارگیری آزمون در دستگاه کشش یونیورسال در شکل ۷ نشان داده شده است.

معیار پذیرش آزمون مطابق استاندارد EN 477 [۲۶] به گونه ای است که از میان ده نمونه مورد آزمایش، وقوع حداکثر یک شکست، مجاز بوده و در صورت مشاهده بیش از یک شکست، مجموعه نمونه ها مردود تلقی می شوند.

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون های مکانیکی انجام شده بر روی پروفیل های UPVC تولید شده با سه فرمولاسیون صنعتی TF-01، TF-02 و TF-03 ارائه شده است. کلیه آزمون ها مطابق با استانداردهای ملی و بین المللی مربوطه انجام شده اند و مقادیر گزارش شده، میانگین نتایج آزمون های تکرار شده هستند.

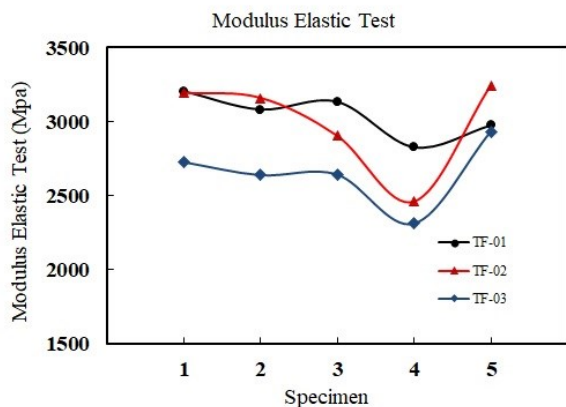
۴-۱- نتایج آزمون مدول الاستیسیته خمشی

نتایج به دست آمده از آزمون مدول الاستیسیته خمشی برای سه فرمولاسیون توسعه داده شده در این پژوهش، در جدول ۵ درج شده و مقادیر متناظر با هر آزمون (تعداد پنج آزمون) در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ و جدول ۶، انحراف معیار داده های مدول خمشی بیانگر پایداری رفتار الاستیک نمونه ها در آزمون سه نقطه ای بوده و نشان می دهد پراکندگی مقادیر مدول خمشی در میان نمونه های هر فرمولاسیون، محدود و بیانگر تکرارپذیری مناسب نتایج آزمون است.

جدول ۶ نتایج آزمون مدول الاستیسیته خمشی

Table 6 The results of the flexural modulus test

Formulation	Individual (Mpa)	Average±SD (Mpa)
TF-01	2825	3042±147.65
TF-02	2458	2991±325.56
TF-03	2310	2649±224.16



شکل ۹ نتایج آزمون مدول الاستیسیته خمشی (پروفیل) نمونه های پروفیل برای فرمولاسیون های مختلف

Fig.9 Modulus Elastic test of Profile Specimens for Different Formulations

نتایج نشان می دهند که فرمولاسیون TF-01 بالاترین مقدار مدول خمشی را دارا است. با افزایش میزان بهبوددهنده ضربه ACR و کاهش درصد کربنات کلسیم در فرمولاسیون های TF-02 و TF-03، کاهش تدریجی مدول خمشی مشاهده می شود. باین حال، مقادیر مدول در تمامی فرمولاسیون ها در محدوده قابل قبول با توجه به استاندارد مرجع [۱۱] برای کاربردهای

$$\sigma_t = (F_t \times L_t) / \omega \quad (7)$$

مقادیر قابل قبول برای تنش خمشی فشاری و کششی گوشه های جوش شده برای پروفیل های UPVC مطابق با استانداردهای مرجع در جدول ۵ درج شده است.

جدول ۵ محدوده مجاز برای مقادیر منفرد و میانگین تنش خمشی فشاری و کششی [۱۱]

Table 5 Permissible limits for individual and mean values of compression and tensile bending stress [11]

Test	Individual (Mpa)	Average (Mpa)
Compression bending stress	≥ 30	≥ 35
Tensile bending stress	≥ 20	≥ 25

۳-۵- آزمون ضربه سقوط آزاد جسم

آزمون مقاومت در برابر ضربه سقوط آزاد یکی از مهم ترین روش های ارزیابی عملکرد واقعی پروفیل های یو پی وی سی در شرایط اقلیمی سرد و تنش های ضربه ای ناگهانی محسوب می شود. این آزمون مطابق با استاندارد ملی ISO 12291-1 [۱۱] و با در نظر گرفتن الزامات استاندارد ملی ISO 20066 [۲۵] و بین المللی EN 477 [۲۶] انجام شد. در این آزمون، ده نمونه از پروفیل های تولید شده از هر فرمولاسیون با طول ۳۰ سانتی متر برش داده شده و سپس به مدت حداقل یک ساعت در دمای ۱۰- تا ۱۲- درجه سانتی گراد قرار داده شدند. به منظور ثبت رفتار واقعی ماده در شرایط دمایی پایین، هر نمونه حداکثر ظرف مدت ۱۰ ثانیه پس از خروج از محفظه سرمایشی مورد آزمون قرار گرفت. فرآیند آزمون برای پروفیل های نوع ۱ (پروفیل های مورد آزمون در این پژوهش)، شامل سقوط یک جسم ضربه زننده با جرم ۱ کیلوگرم از ارتفاع ۱ متر بر سطح نمونه بود که منجر به اعمال یک ضربه ناگهانی و شدید به پروفیل می شود. در شکل ۸ نحوه انجام آزمون ضربه سقوط آزاد جسم در انستیتو تکنولوژی پلاستیک روزوین نشان داده شده است.



شکل ۸ نحوه انجام آزمون ضربه سقوط آزاد جسم
Fig. 8 The procedure of falling weight impact test

ساختمانی باقی‌مانده‌اند که نشان‌دهنده حفظ سختی مناسب پروفیل‌ها است.

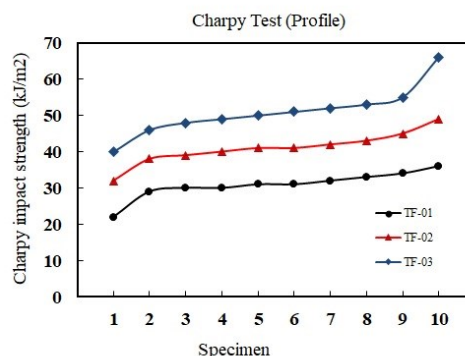
۲-۴- نتایج آزمون مقاومت ضربه چارپی ماده و پروفیل

نتایج آزمون مقاومت ضربه چارپی ماده و پروفیل برای سه فرمولاسیون TF-01، TF-02 و TF-03 به همراه انحراف معیار نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین نتایج بدست آمده برای ده آزمون در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۷ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقادیر انحراف معیار هر دو آزمون چارپی نشان می‌دهد که همه نمونه‌ها از هر سه فرمولاسیون، از یکنواختی قابل‌قبولی در مقاومت به شکست برخوردار بوده‌اند و فرمولاسیون TF-03 کمترین پراکندگی و بیشترین چقرمگی را داشته است.

جدول ۷ نتایج آزمون چارپی پروفیل و ماده

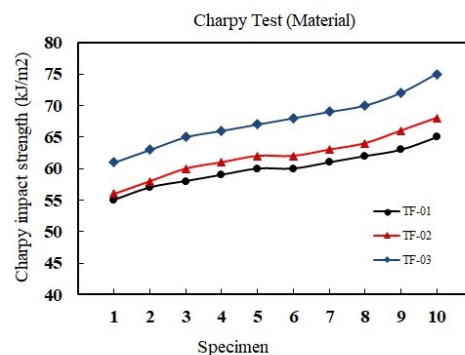
Table 7 The results of the Charpy impact strength test

Formulation	Profile Charpy, Individual, (kJ/m ²)	Profile Charpy, Average± SD, (kJ/m ²)	Material Charpy, Average± SD, (kJ/m ²)
TF-01	22	30.8± 3.8	60± 3.2
TF-02	32	41 ± 4.4	62± 3.5
TF-03	40	51± 6.7	68± 4.1



شکل ۱۰ نتایج آزمون ضربه چارپی (پروفیل) نمونه‌های پروفیل برای فرمولاسیون‌های مختلف

Fig.10 Charpy Impact Strength (Profile) of Profile Specimens for Different Formulations



شکل ۱۱ نتایج آزمون ضربه چارپی (ماده) نمونه‌های پروفیل برای فرمولاسیون‌های مختلف

Fig.11 Charpy Impact Strength (Material) of Profile Specimens for Different Formulations

بر اساس الزامات استاندارد INSO 12291-1 (جدول ۳) برای پروفیل‌های نوع B، حداقل مقدار مجاز مقاومت ضربه چارپی پروفیل برابر با ۲۵ کیلوژول بر مترمربع برای مقادیر منفرد و ۴۵ کیلوژول بر مترمربع مقدار میانگین است. با توجه به جدول ۷، تنها فرمولاسیون TF-03 موفق به دستیابی به حداقل مقدار میانگین موردنیاز استاندارد (45 kJ/m²) شده است، درحالی‌که فرمولاسیون‌های TF-01 و TF-02 با وجود بهبود نسبت به یکدیگر، همچنان مقادیر میانگین کمتر از حد مجاز استاندارد را نشان دادند. از نظر مقادیر منفرد، فرمولاسیون‌های TF-02 و TF-03 به ترتیب با مقادیر ۳۲ و ۴۰ کیلوژول بر مترمربع الزامات استاندارد را برآورده کردند، درحالی‌که فرمولاسیون TF-01 با مقدار ۲۲ کیلوژول بر مترمربع کمتر از حداقل مقدار مجاز قرار گرفت و عدم انطباق با الزامات استاندارد را نشان داد. این نتایج بیانگر بهبود قابل‌توجه مقاومت ضربه‌ای پروفیل با افزایش میزان ACR و حذف CPE از فرمولاسیون است. در رابطه با عدم انطباق TF-01، مستقیماً فرضیه تمرکز تنش ناشی از حضور پرکننده معدنی را تأیید می‌کند. همان‌طور که در بخش مواد اولیه ذکر شد، حضور کربنات کلسیم (CaCO₃) در مقادیر بالا، به دلیل تفاوت مدولی با ماتریس PVC، منجر به ایجاد نواحی ضعیف یا نقاط تمرکز تنش در مرزهای فازی می‌شود. این نقاط، انرژی ضربه را به جای جذب یکنواخت در شبکه پلیمری، به سمت شروع و گسترش میکروتکرک‌ها هدایت می‌کنند که نتیجه آن کاهش شدید چقرمگی است. در فرمولاسیون‌های TF-02 و TF-03، با کاهش سطح کربنات کلسیم و افزایش میزان ACR، پیوستگی شبکه پلیمری بهبود یافته و ناهماهنگی‌های فازی کاهش یافته است. این امر باعث شده تا انرژی ضربه به طور مؤثرتری توسط بهبوددهنده‌های ACR جذب و پراکنده شود، که تجلی آن افزایش مقاومت ضربه چارپی در این دو نمونه نسبت به TF-01 است.

در مقابل، نتایج آزمون مقاومت ضربه چارپی ماده نشان داد که مقادیر میانگین برای هر سه فرمولاسیون TF-01، TF-02 و TF-03 به ترتیب برابر با ۶۰، ۶۲ و ۶۸ کیلوژول بر مترمربع بوده است. با توجه به حداقل مقدار مجاز استاندارد برای پروفیل نوع B، هر سه فرمولاسیون الزامات استاندارد را برآورده کرده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار کامپاند پایه در هر سه فرمولاسیون از چقرمگی کافی برخوردار بوده و افزایش میزان ACR همراه با کاهش درصد کربنات کلسیم منجر به بهبود بیشتر مقاومت به شکست ماده شده است.

۳-۴- نتایج آزمون مقاومت ضربه کششی

نتایج آزمون مقاومت ضربه کششی برای سه فرمولاسیون TF-01، TF-02 و TF-03 به همراه انحراف معیار نتایج، در جدول ۸ و شکل ۱۲ ارائه شده است. انحراف معیار مقادیر آزمون ضربه کششی نشان‌دهنده یکنواختی عملکرد همه نمونه‌ها در تحمل انرژی شکست بوده و بیانگر تکرارپذیری مناسب آزمون در محدوده تغییرات کمتر از ۱۵٪ میان میانگین‌ها است. بر اساس حدود مجاز استاندارد (جدول ۴)، مقدار مقاومت ضربه کششی منفرد باید حداقل ۴۵۰ و مقدار میانگین حداقل ۶۰۰ کیلوژول بر مترمربع باشد. فرمولاسیون TF-01 با مقدار منفرد ۲۹۷ و میانگین ۳۱۵ کیلوژول بر مترمربع، به‌طور قابل‌توجهی کمتر از حدود مجاز بوده و عدم

نتایج آزمون استحکام گوشه‌های جوش شده به همراه انحراف معیار نتایج در جدول ۹ درج شده است. فرمولاسیون TF-01 بالاترین مقدار تنش خمش فشاری را ثبت کرد، درحالی‌که فرمولاسیون TF-03 بیشترین تنش خمش کششی را از خود نشان داد. فرمولاسیون TF-01 در هر دو آزمون مقادیر پایین‌تری نسبت به دو فرمولاسیون دیگر ارائه داد اما در حالت کلی می‌توان اظهار داشت که نتایج بدست‌آمده برای تنش خمش فشاری و کششی برای هر سه فرمولاسیون نزدیک به هم بوده و بالاتر از حد مجاز تعیین‌شده توسط استانداردهای مرجع است که بیانگر استحکام بسیار خوب اتصال جوش‌شده در هر سه فرمولاسیون است.

جدول ۹ نتایج آزمون خمشی گوشه‌های جوش شده

Table 9 The results of bending test for welded corners

Formulation		TF-01	TF-02	TF-03
Compression bending	Average±SD(Mpa)	45±1.0	43±0.8	44±0.9
	Individual (Mpa)	38	36	36
Tensile bending	Average±SD (Mpa)	41±1.5	40±2.6	42±1.7
	Individual (Mpa)	38	35	39

۴-۵ - نتایج آزمون ضربه سقوط آزاد جسم در دمای پایین

نتایج آزمون ضربه سقوط آزاد جسم در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که هر سه فرمولاسیون موردبررسی عملکرد مطلوبی داشته‌اند. در هیچ‌یک از فرمولاسیون‌ها بیش از یک شکست در میان ده نمونه مشاهده نشد و تمامی ترکیب‌ها معیار پذیرش استاندارد را برآورده کردند. این نتایج نشان‌دهنده مقاومت مناسب پروفیل‌ها در برابر ضربه ناگهانی در شرایط دمایی پایین و شبیه‌سازی شده اقلیمی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر نوع و مقدار بهبوددهنده‌های ضربه (ACR و CPE) و میزان کربنات کلسیم بر خواص مکانیکی پروفیل‌های UPVC درب و پنجره با استفاده از سه فرمولاسیون صنعتی TF-01، TF-02 و TF-03 موردبررسی تجربی قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که ترکیب و نسبت اجزای فرمولاسیون تأثیر مستقیمی بر رفتار مکانیکی، به‌ویژه مقاومت ضربه‌ای، مدول خمشی و استحکام گوشه‌های جوش شده دارد. نتایج بدست آمده از این پژوهش به‌طور خلاصه به شرح زیر هستند:

- با افزایش میزان ACR، اگرچه مدول الاستیسیته خمشی کاهش پیدا می‌کند، اما تمامی فرمولاسیون‌ها همچنان در محدوده قابل‌قبول استاندارد باقی می‌مانند و سختی و چقرمگی مناسب برای کاربردهای ساختمانی حفظ می‌شود.

- افزایش میزان ACR منجر به بهبود قابل‌توجه مقاومت ضربه‌ای می‌شود، به‌طوری‌که فرمولاسیون TF-03 تنها ترکیبی است که الزامات استاندارد را در آزمون‌های ضربه چارپی پروفیل و مقاومت ضربه کششی به‌طور کامل برآورده می‌کند.

- نتایج آزمون‌های استحکام گوشه‌های جوش شده و ضربه سقوط آزاد در دمای پایین نیز نشان داد که هر سه فرمولاسیون از استحکام اتصال و مقاومت ضربه‌ای مناسبی برخوردار هستند.

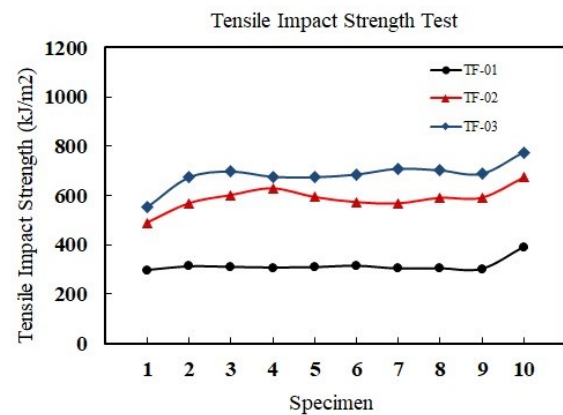
- در مجموع، فرمولاسیون TF-03 به‌عنوان ترکیب بهینه، بهترین تعادل بین سختی و چقرمگی را فراهم کرده و بیشترین

انطباق کامل با الزامات استاندارد را نشان می‌دهد. فرمولاسیون TF-02 دارای مقدار منفرد ۴۸۹ کیلوژول بر مترمربع است که در محدوده قابل‌قبول قرار دارد، اما مقدار میانگین آن اندکی کمتر از حد مجاز است و در مرز پذیرش قرار نمی‌گیرد. در مقابل، فرمولاسیون TF-03 با مقدار منفرد ۵۵۲ و میانگین ۶۸۳ کیلوژول بر مترمربع، الزامات استاندارد را به‌طور کامل برآورده کرده و بهترین عملکرد ضربه‌ای را در میان نمونه‌ها نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که بهبود فرمولاسیون منجر به افزایش معنی‌دار مقاومت ضربه کششی شده و تنها فرمولاسیون TF-03 انطباق کامل با معیارهای استاندارد را فراهم می‌کند.

جدول ۸ نتایج آزمون مقاومت ضربه کششی

Table 8 The results of the tensile impact strength test

Formulation	Individual (kJ/m ²)	Average±SD (kJ/m ²)
TF-01	297	315±5.7
TF-02	489	588±55.7
TF-03	552	683±73.3



شکل ۱۲ نتایج آزمون ضربه کششی نمونه‌های پروفیل برای فرمولاسیون‌های مختلف

Fig.12 Tensile Impact Strength of Profile Specimens for Different Formulations

مقاومت ضربه کششی پایین‌تر در فرمولاسیون TF-01 نسبت به دو فرمولاسیون دیگر، می‌تواند ناشی از یک اثر تداخلی منفی بین غلظت بالای کربنات کلسیم و نسبت‌های میانه CPE و ACR باشد. در TF-01، حجم بالای ذرات سخت کربنات کلسیم (۳۶ Phr) باعث افزایش تراکم نقاط تمرکز تنش (Stress Concentration) در ماتریس شده است. این امر، کارایی هر دو بهبوددهنده ضربه (CPE و ACR) را به دلیل محدودیت در پوشش‌دهی کامل و توزیع یکنواخت ذرات کاهش می‌دهد. درواقع، حضور همزمان CPE و ACR در مقادیر متوسط در محیطی که حجم فاز پیوسته توسط پرکننده‌های معدنی اشغال شده، مانع از تشکیل شبکه بهینه می‌شود. در حالی که CPE و ACR به تنهایی (مانند TF-03) می‌توانند به طور موثر انرژی ضربه را جذب کنند، اما در TF-01، رقابت برای فضای بین‌فازی و عدم کارایی کامل در شکستن ذرات کربنات کلسیم، منجر به ایجاد شکاف‌های ریز و شروع زودرس ترک شده است.

۴-۴ نتایج آزمون استحکام گوشه‌های جوش شده (خمش فشاری و خمش کششی)

نقش نویسندگان: نگین معلمي خیاوی: انجام و تحلیل آزمایش‌ها و نگاشتن مقاله - ۶۵٪ - عطا توکلی اول: تحلیل و طراحی فرمولاسیون - ۳۵٪

تعارض منافع: این پژوهش در چارچوب فعالیت‌های تحقیق و توسعه صنعتی انجام شده است. نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی یا مالی که بر نتایج و تحلیل‌های ارائه‌شده تأثیرگذار باشد، وجود ندارد.

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش توسط انستیتو تکنولوژی پلاستیک مجتمع صنعتی روزوین، اردبیل، تأمین شده است.

منابع

- [1] S.H. Kakhk, J. Keyvan Rad, H. Abedini, A.R. Mahdavian, "Thermomechanical study on toughened PVC with an acrylic impact modifier: A comparative analysis", *Polymer Testing*, vol. 124, 108670, 2024. doi: 10.1016/j.polymer.2023.126545
- [2] Sh. Luo, S. Pan, H. Chang, M. Zhang, W. Yu, Zh. Lai, "Influence mechanism of mechanical properties and crack formation of CaCO₃/PVC composites based on cohesion model", *Materials Today Communications*, Vol. 31, 103747, 2022. doi: org/10.1016/j.mtcomm.2022.103747.
- [3] S. Luo, S. Pan, "Numerical study on the effect of CaCO₃ ratio on the mechanical properties of CaCO₃/PVC composites", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1820, NO.1, 012145, 2021. doi:10.1088/1742-6596/1820/1/012140
- [4] T. Wang, X. Li, Y. Xiong, Sh. Guo, "Super tough PVC/CPE composites: an efficient CPE network by an MGA copolymer prepared through a vibro-milling process", *RSC Advances*, Vol. 10, No. 72, 44584-44592, 2020. doi:10.1039/D0RA08980J.
- [5] Zh. Jiang, J. Wang, R. Ge, Ch. Wu, "The effects of surface modification of ground calcium carbonate powdery fillers on the properties of PVC", *Polymer Bulletin* Vol. 75, No, pp. 1-167, 2018. doi:10.1007/s00289-017-2081-4.
- [6] P. Joshi, D. Marathe, "Experimental investigation of mechanical properties of impact-modified PVC/fly ash composites", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 7, No. 1, 34-47, 2019. doi:10.4236/jmmce.2019.71003
- [7] Ch. Chen, Ch. Teng, Sh. Su, Ch. Yang, "Effects of microscale calcium carbonate and nanoscale calcium carbonate on the fusion, thermal, and mechanical characterizations of rigid poly(vinyl chloride)/calcium carbonate composites", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 44, No. 2, 2005. doi:10.1002/polb.20721
- [8] J. Yu, P. Feng, H. Zhang, "Effects of Core-Shell acrylate particles on impact properties of chlorinated polyethylene/polyvinyl chloride blends", *Polymer Engineering&Science*, vol. 50, No. 2, 2010. doi: 10.1002/pen.21539.
- [9] N. Guermazi, N. Haddar, Kh. Elleuch, H.F. Ayedi, "Effect of filler addition and weathering conditions on

انطباق با الزامات استاندارد را نشان می‌دهد. حذف کامل CPE و جایگزینی آن با ACR، الزامات استاندارد 1-12291 INSO را محقق ساخت. مهم‌ترین دستاورد مکانیکی این تحقیق، اثبات این نکته است که کاهش غلظت کرنات کلسیم، با کاهش مؤثر تمرکز تنش‌های ناشی از پرکننده در ماتریس پلیمری، مستقیماً عامل اصلی در افزایش چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی ضربه فرمولاسیون نهایی (TF-03) بوده است. این یافته، درک ما را از طراحی پایدار پروفیل‌های UPVC ارتقا می‌دهد.

- این پژوهش نشان می‌دهد که دستیابی به مقاومت ضربه‌ای مطابق با استانداردها در حضور مقادیر بالای کرنات کلسیم ($30 \geq \text{Phr}$) نیازمند یک رویکرد بهینه‌سازی چندعاملی است. توصیه عملی برای صنعت این است که در فرمولاسیون‌هایی با سطح پرکننده بالا، نسبت CPE به ACR باید با دقت بسیار بیشتری تنظیم شود تا از اثرات تداخلی جلوگیری شود؛ به نظر می‌رسد نسبت بهینه، به سمت غلبه‌ی تأثیر CPE یا تنظیم بسیار دقیق ACR برای سازگاری با سطوح بالای کرنات کلسیم متمایل است، همان‌طور که در TF-03 مشاهده شد.

- برای پژوهش‌های آتی، بررسی اثر پوشش‌دهی سطحی کرنات کلسیم (Surface Modification) با استفاده از استئارات‌ها یا عوامل جفت‌کننده جدید برای بهبود پیوند مرزی (Interfacial Bonding) در فرمولاسیون‌های با پرکننده بالا پیشنهاد می‌گردد.

فهرست علائم

فاصله بین محورهای چرخش سطوح قرار گرفته روی تکیه‌گاه‌های لغزنده	a
در آزمون خمش فشاری گوشه‌های جوش شده (mm)	
مقاومت به ضربه چارپی برای آزمون‌های شکافدار (kJ/m^2)	a_{CN}
مقاومت به ضربه کششی (kJ/m^2)	a_{EU}
عرض آزمون چارپی (mm)	b
عرض باقیمانده بین دو شکاف در آزمون چارپی (mm)	b_N
ماکزیمم فاصله از تار خنثی مقطع عرضی پروفیل (mm)	c
انرژی تصحیح شده شکست ضربه‌ای (J)	E_C
نیروی شکست در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای (N)	F
نیروی شکست در آزمون خمش فشاری گوشه‌های جوش شده (N)	F_C
نیروی شکست در آزمون خمش کششی گوشه‌های جوش شده (N)	F_t
ضخامت پروفیل (mm)	h
ممان اینرسی سطح مقطع عرضی پروفیل (mm^4)	I
طول آزمون خمش سه‌نقطه‌ای (mm)	L
فاصله بین محل اعمال نیرو تا داخلی‌ترین نقطه گوشه در آزمون خمش کششی (mm)	L_t
عرض قسمت باریک آزمون نوع پنج برای آزمون ضربه کششی (mm)	x

علائم یونانی

تنش خمش فشاری (Mpa)	σ_c
مدول الاستیسیته خمشی (Mpa)	σ_f
تنش خمش کششی (Mpa)	σ_t
مدول مقاومت مقطع عرضی پروفیل (mm^3)	ω

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

properties- Part 1: Non-Instrumented impact test, ISO 179-1: 2010, Geneva, Switzerland.

[20] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (INSO), Plastics Determination of charpy impact properties- Part 1: Non-Instrumented impact test, INSO 9277-1, Tehran, Iran.

[21] International Organization for Standardization (ISO), Determination of tensile-impact strength, ISO 8256 : 2004, Geneva, Switzerland.

[22] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), Plastics — Determination of tensile-impact strength, ISIRI 10919, Tehran, Iran.

[23] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), Unplasticized polyvinylchloride(PVC-U) for the fabrication of windows and doors – Determination of the strength of welded corners and T-joints, ISIRI 10930, Tehran, Iran.

[24] British Standards Institution (BSI), Unplasticized polyvinylchloride (PVC-U) profiles for the fabrication of windows and doors — Determination of the strength of welded corners and T-joints, BS EN 514:2000, London, United Kingdom.

[25] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (INSO), Unplasticized polyvinylchloride (PVC-U) profiles for the fabrication of windows and doors – Determination of the resistance to impact of main profiles by falling mass at low temperature – Test method, INSO 20066, Tehran, Iran.

[26] British Standards Institution (BSI), Unplasticized polyvinylchloride (PVC-U) profiles for the fabrication of windows and doors- Determination of the resistance to impact of main profiles by falling mass, BS EN 477: 1999, London, United Kingdom.

PVC/CaCO₃ composites", Polymer Composites, vol. 37, No. 7, pp. 506–514, 2015. doi: 10.1002/pc.23396.

[10] V. Fernandes Hachich, V. Agopyan, "Influence of composition of uPVC on mechanical properties of window profiles exposed to weathering", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 20, No. 3, pp. 199–205, 2008. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(199)

[11] Unplasticized Poly(vinyl chloride) (UPVC) profiles for doors and windows — Specifications and test methods — Part 1: Profiles, INSO 12291-1, Tehran, Iran. (In Persian).

[12] M. Sciller, PVC Additives, pp. 200-204, Hanser publisher, Munich, 2015.

[13] Zh. Zhang, Ch. Shuangjun, J. Zhang, B. Li, X. Jin, "Influence of chlorinated polyethylene on poly (vinyl chloride)/poly (α-methylstyrene-acrylonitrile) blends: Mechanical properties, morphology and thermal properties", Polymer Testing, Vol. 29 , No. 8, ,pp. 995-1001,2010. doi: 10.1016/j.polymertesting.2010.09.003

[14] S. H. H. Kakhk, J. Keyvan Rad, H. Abedini, A. R. Mahdavian, "Thermomechanical study on toughened PVC with an impact modifier based on core-shell particles", Polymer, Vol. 290, 126545, 2023. doi:10.1016/j.polymer.2023.126545

[15] A.R. Ghomi, H. Salehi-Mobarakeh, A. R. Mahdavian, "Impact resistance enhancement of PVC compounds with novel core-shell silicone-acrylate impact modifiers", Materials, Vol. 16, 389, 2025. doi: 10.1016/j.porgcoat.2025.109180.

[16] X. Liao, D. Zhang, J. Li, L. Ji, Y. Chen, J. Xie, Zh. Zhu, G. Yu, Surface modification of ground calcium carbonate by emulsion polymerization method and its utilization in PVC composite, Materials Science and Technology, 2025. doi:10.1177/02670836251337287.

[17] International Organization for Standardization (ISO), Plastics Determination of flexural properties, ISO 178, Geneva, Switzerland.

[18] Institute of Standards and Industrial Research of Iran (INSO), Plastics — Determination of flexural properties, INSO 357, Tehran, Iran.

[19] International Organization for Standardization (ISO), Plastics–Determination of charpy impact