



## Time Dependent Analysis of the Behavior of GFRP-Strengthened Steel Tubes under Stepwise Loading and Stress Relaxation

Ramin Beyranvand<sup>a</sup>, Mehdi Ansari<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

### Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Beyranvand R, Ansari M. Time Dependent Analysis of the Behavior of GFRP-Strengthened Steel Tubes under Stepwise Loading and Stress Relaxation. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(1):146-170.

 <https://10.52547/masm.5.1.146>

### KEYWORDS

Composite,  
GFRP,  
Stepwise Loading,  
Relaxation.

### ABSTRACT

In this study, the time-dependent behavior and stress relaxation of API-X42 seamless steel pipes reinforced with glass fiber composites were investigated to assess the effects of time on system stability and load-bearing capacity. A composite layer of E-glass fibers embedded in epoxy resin was applied to the pipe joint regions. Tensile tests were conducted in single-step and multi-step modes, with a 10minute hold at each stage, and the stress–time data were recorded in normalized form. The results indicated that lower loading rates promoted gradual stress relaxation and extended system stability, whereas higher rates led to faster stress release and attainment of a stable state in the early stages. Moreover, increasing the number of loading steps resulted in cumulative stress reduction and brought the system behavior closer to a quasi-stable state. At loading rates of 50, 100, and 200 mm/min, the final stress relaxation values were recorded as 8.9%, 7.7%, and 9.4%, respectively. These findings highlight the key role of resin viscoelasticity and stress distribution between fibers and steel in the mechanical stability of the system and underscore the importance of evaluating time-dependent behavior in the design and long-term performance prediction of reinforced steel pipes. The results of this study provide clear guidance for future research aimed at comprehensively investigating the effects of multi-step loading and ultimate failure mechanisms in steel-composite hybrid systems.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

Steel pipes, as fundamental components in strategic industries such as oil, gas, petrochemicals, and energy transmission systems, play a critical role in ensuring the stable performance of infrastructure and the global energy supply. The importance of these structures is not limited to the transportation of liquids and gases; their reliable performance is directly linked to economic efficiency, reduced operational costs, and environmental protection. Extensive networks of underground and subsea pipelines, used across many geographical regions for energy transmission, are exposed to a wide range of threatening factors that can lead to premature failure and reduced safety [1, 2]. Such threats include corrosion in aggressive environments, high internal pressures, cyclic mechanical loads, temperature fluctuations, and physical impacts [3, 4]. The combination of these effects gradually reduces wall thickness, induces surface and deep cracks, and ultimately causes sudden pipe failure. Industrial reports indicate that the costs associated with pipeline failures, including production downtime, emergency repairs, and environmental impacts, are substantial, highlighting the need for preventive and sustainable methods to extend the service life of these structures [5].

\* Corresponding author. Tel.: 08633400696

E-mail address: [ansari@arakut.ac.ir](mailto:ansari@arakut.ac.ir)

DOI: <https://10.52547/masm.5.1.146>

Received: May 08, 2025; Received in revised form: May 18, 2025; Accepted: June 21, 2025.

© Author



Conventional methods for repairing and strengthening steel pipes, including replacing damaged sections, welding, and installing metal sleeves, despite limited effectiveness, face significant practical and economic challenges. In marine and underwater environments, these methods require complex operations, heavy equipment, and prolonged operational shutdowns [2, 6]. Additionally, high labor and equipment costs have driven research and industrial efforts toward alternative, cost-effective approaches. Among these, the use of fiber-reinforced polymer (FRP) composites has emerged as an innovative and effective solution [1, 2]. To provide a comprehensive view of composite materials and illustrate recent research trends in thermoplastic polymers, several studies on biocomposites applications have also been considered [7-10]. These reinforced systems, with features such as high corrosion resistance, lightweight, ease of installation, and the ability to restore load-carrying capacity without extended operational downtime, have gained a prominent role in pipe repair and strengthening [1, 2, 4]. Due to their unique properties, FRP strengthening systems are recognized as one of the most promising technologies for repairing and enhancing the durability of steel pipes in marine and industrial environments [1, 2, 6].

Extensive research has examined the effectiveness of composite systems in improving the mechanical behavior of steel pipes. Results indicate that applying composite coatings can increase the load-carrying capacity of pipes [4, 5], enhance their resistance to crack growth and fatigue [11, 12], and reduce stress concentration in damaged areas [6, 13]. In addition to experimental findings, numerical modeling and finite element simulations have been widely used to predict the behavior of strengthened pipes [14, 15]. Studies show that finite element models can predict the overall mechanical response of pipes with reasonable accuracy, and their results are consistent with experimental data [14, 15]. Furthermore, design and manufacturing variables such as fiber type, ply orientation, reinforcement thickness, filler properties, and environmental conditions play a critical role in the performance of strengthened systems [3, 4, 16]. In particular, environmental conditions, such as seawater exposure, can significantly affect the mechanical durability and load-carrying capacity of reinforced systems [16].

Despite extensive research on FRP strengthening of steel pipes, most studies have focused on short-term and instantaneous behavior, with limited attention to time-dependent responses. In real-world operations, pipes are subjected to complex, time-dependent loading, including cyclic, repeated, and stepwise loads. Two important time-dependent phenomena in polymeric and composite materials are creep and stress relaxation. Stress relaxation arises from the viscoelastic nature of polymer matrices and their interaction with reinforcing fibers. In pipe strengthening systems, load transfer between steel and composite layers occurs through adhesives and resin, and the occurrence of stress relaxation can alter stress distribution at the interface and affect the ultimate load-carrying capacity [6, 17]. Recent studies have also demonstrated that even in thermoset polymers such as epoxy, the network architecture and the evolution of the cure degree significantly influence the stress-relaxation and creep time scales. The viscoelastic response of the material persists under long-term loading, which is of particular importance when evaluating the long-term performance of reinforced pipe systems [18].

The importance of examining time-dependent stress relaxation is further emphasized by the fact that loading in industrial and marine environments is often applied in a stepwise or cyclic manner rather than as a single instantaneous load [11, 12, 19]. Environmental conditions and variable external forces provide sufficient opportunity for stress-relaxation effects to develop during each loading stage, and neglecting these effects can lead to significant discrepancies between standardized laboratory results and the actual in-service performance of reinforced systems. However, a review of the literature indicates that despite extensive attention to ultimate capacity, fatigue behavior, and environmental durability, direct investigations into the influence of stress relaxation in composite-reinforced steel pipes remain limited. This scientific gap further underscores the necessity of examining time-dependent effects in such systems.

Related studies have shown that the stress-relaxation behavior of fiber-reinforced polymer (FRP) bars particularly basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars play a critical role in marine and prestressed applications. In one investigation, the long-term stress relaxation of BFRP bars under various initial stress levels and environmental conditions was evaluated. The results demonstrated that their stress-relaxation behavior exhibits a linear relationship with the logarithm of time and is strongly dependent on the applied initial stress level. The influence of seawater was found to be minimal, indicating the suitability of these bars for marine structures, whereas acidic and alkaline environments significantly increased stress-relaxation deformation and even caused bar failure under the same stress level. The predicted stress reduction after one million hours ranged from 7.76% to 13.75%, and seawater exposure increased this value to approximately 16.13% [20].

Identifying the presence and extent of stress relaxation in composite-reinforced steel pipes is of significant scientific and industrial importance, as it can contribute to improved strengthening system design, enhanced reliability, and more accurate performance prediction under real operational conditions.

## 2. Materials and Fabrication Methods

The present study, through carefully controlled laboratory conditions, aims to comprehensively investigate the influence of stress relaxation on force reduction and the time-dependent behavior of composite reinforced steel pipes. Unlike previous research which has primarily focused on ultimate capacity or short-term structural response this work systematically examines the effects of stepwise loading and time-dependent behavior across various loading rates and simulated operational conditions. The main innovation of this research lies in its detailed recording and evaluation of force variation and stress relaxation over time, providing deep insight into stress redistribution mechanisms, the influence of dwell periods between loading stages, and the cumulative evolution of stress within composite layers factors that have been only partially or inconsistently addressed in earlier studies. The findings of this investigation not only offer a more accurate scientific understanding of the viscoelastic response of the epoxy matrix and its interaction with glass fibers in steel composite systems but also hold substantial practical significance. The results can support improved strengthening system design, better prediction of longterm durability and failure capacity, and optimized maintenance strategies for industrial and offshore pipelines. Overall, by introducing an integrated and application-oriented methodology, this study effectively fills the existing scientific gap regarding time dependent effects and stress relaxation in composite-reinforced steel pipes and clearly outlines a foundational direction for future research.

### 2.1. Materials

and a Young's modulus of 210 GPa were used to fabricate the reinforced specimens. This pipe grade is widely employed in the oil and gas industry due to its favorable mechanical properties, including adequate tensile strength, good ductility, and reliable resistance to internal pressure. The seamless configuration was selected because of its more uniform microstructure, higher strength, and reduced likelihood of leakage or cracking at welded joints, making it a safer and more dependable option for strengthening applications. For the composite wrapping, LR620 epoxy resin with a Young's modulus of 3 GPa specifically formulated for hand lay-up processes was used. Owing to its strong adhesion to metallic surfaces, suitable chemical resistance, and appropriate viscosity for fiber impregnation, this resin enables the formation of a uniform and durable composite layer on the pipe surface. It also provides superior mechanical stability under environmental exposure compared to commonly used alternative resins. The reinforcing fibers consisted of 200 g/m<sup>2</sup> woven E-glass fabric with a Young's modulus of 72 GPa and an 8×7 weave pattern. This glass fabric, with its regular weave architecture and appropriate warp weft density, offers desirable tensile strength, adequate flexibility, and effective resin absorption, ensuring uniform stress distribution within the composite layer.

### 2.2. Fabrication and Sample Preparation

To prepare the specimens, API X42 steel pipes were first cut into 165-mm segments, and the end surfaces of each piece were uniformly ground and sanded to obtain a controlled roughness and a suitable bonding surface. Following thorough cleaning with thinner and acetone, the two pipe ends were joined using a high-strength epoxy adhesive to ensure the required continuity for the wrapping process. The composite wrapping was applied using the hand lay-up method. For this purpose, the LR620 epoxy resin and its hardener were mixed according to the manufacturer's instructions at a weight ratio of 10 to 2 mL. After uniform mixing, an initial resin layer was applied to the prepared surface. Subsequently, the woven glass fabric providing an approximate thickness of 0.2 mm per layer was fully impregnated with resin and sequentially placed over the joint region to form an integrated composite wrap. The reinforced zone consisted of 75 mm from the end of the first pipe and 75 mm from the beginning of the second pipe, resulting in a total wrap length of 150 mm so that the joint was positioned precisely at the mid-length of the composite region. A total of 15 fiber layers were applied to each specimen, which yielded a final composite thickness of approximately 3 mm based on the per-layer thickness. Figure 1(a) illustrates the schematic view of the steel pipe and the GFRP wrapped region, while Figure 1(b) shows the fabricated wrapped specimens.

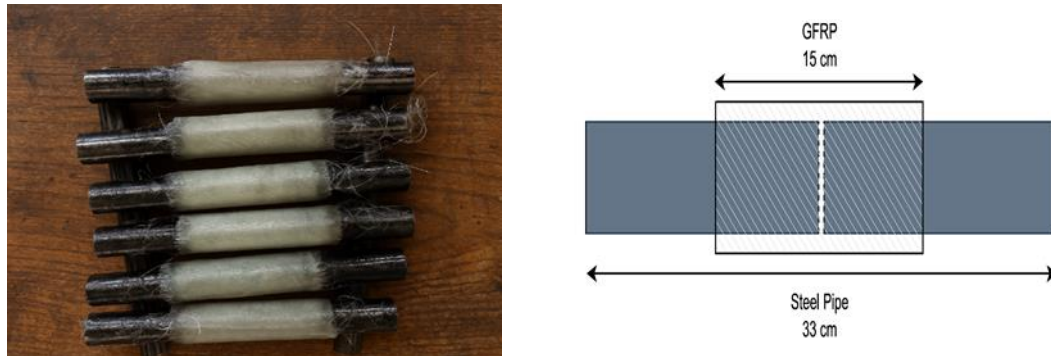


Figure 1. (a) Schematic view of the steel pipe wrapped with GFRP (b) GFRP-wrapped steel pipe specimens

### 2.3. Experimental Design

In order to accurately evaluate the mechanical behavior of the GFRP-wrapped steel pipes and to analyze the stress reduction associated with stress relaxation, tensile tests were designed and conducted under both single-step and multi-step loading conditions. The fundamental concept behind this design was to simulate realistic operational conditions, where offshore structures and subsea pipelines are rarely subjected to instantaneous and uniform loading; instead, the applied forces typically occur in several stages with specific time intervals. Recent studies have shown that during service life, offshore steel pipelines are exposed to cyclic loading that not only induces fatigue damage but also promotes corrosion, making time-dependent fracture behavior a critical factor in structural integrity assessment [21]. Such an experimental approach allows investigation of the effect of dwell periods on force decay and stress redistribution within the composite layers, thereby providing a more realistic representation of system behavior under actual environmental and operational loading conditions.

Initially, a preliminary test was conducted to determine the maximum displacement before specimen failure. The reinforced pipe failure displacement was found to be 3.32 mm. Based on this value, a reference displacement of 3 mm was selected for the main experiments to ensure that specimens remained within a safe operational range and to allow stepwise evaluation of stress relaxation. Stepwise loading was designed in four configurations to analyze the effects of the number of steps and intermediate pauses on stress variations and relaxation behavior:

- Single-step loading (S1): A single tensile stage with a displacement of 1 mm, followed by a 10-minute dwell period after reaching this displacement.
- Two-step loading (S2): Two consecutive tensile stages, each with 1 mm displacement, with a 10-minute pause between stages (S2-1 and S2-2).
- Three-step loading (S3): Three consecutive tensile stages, each with 1 mm displacement, with a 10-minute pause between stages (S3-1 to S3-3).
- Four-step loading (S4): Four consecutive tensile stages, each with 0.75 mm displacement, with a 10-minute pause between stages (S4-1 to S4-4).

This stepwise loading scheme, developed based on preliminary tests, the displacement capacity of the specimens, and the necessity of generating different stress levels to examine the stress relaxation behavior, simulates realistic and variable loading conditions, where the applied force may be sudden or gradual, and the pause durations between stages allow stress relaxation effects to manifest. At each stage, force–displacement data were recorded using the STM-250 tensile testing machine, and data normalization was performed with respect to the applied loading durations. Stress normalization was conducted by dividing the measured stress values by the maximum stress. This normalization enabled precise analysis of stress relaxation magnitude and its effect on the load-bearing capacity of the pipes. Furthermore, to investigate the influence of loading rate on stress relaxation behavior, the tests were performed at three different speeds: 50, 100, and 200 mm/min. The selected rates were consistent with the study conducted by Stochioiu et al. [22]. This range of loading rates allows for analysis of the effect of load application speed on stress reduction and relaxation timing and can be employed in engineering design and in predicting the structural performance of pipes under realistic operational conditions.

Table 1 presents the overall experimental design, systematically combining the loading stages and different rates. This table illustrates the four stepwise loading configurations and the influence of loading rates on the stress relaxation process, forming the basis for in-depth relaxation behavior analysis in the results section of the paper.

**Table 1. Experimental design of the conducted tests**

Loading Rate (mm/min)	Loading Type	Stage Code	Holding Time per Step (min)
50	Single Step	S1-1	10
50	Two Step	S2-1 + S2-2	10
50	Three Step	S3-1-S3-3	10
100	Single Step	S1-1	10
100	Two Step	S2-1 + S2-2	10
100	Three Step	S3-1-S3-3	10
100	Four Step	S4-1-S4-4	10
200	Four Step	S4-1-S4-4	10

### 3. Results

To accurately evaluate the stress relaxation behavior, a series of stepwise tensile tests were conducted at different loading rates. Figure 2 shows the specimen in the tensile testing machine, and the normalized results are presented in Table 2 to enable direct comparison across loading conditions and progression rates. Prior to analyzing the normalized plots, the raw data, including the minimum and maximum stress values at each loading stage, are reported in Tables 3 to 5. These data provide a detailed representation of the actual behavior of the composite layers under gradual loading and serve as the basis for analyzing stress relaxation behavior over different time scales. Comparison of these data indicates that increasing the loading rate, as well as the number of loading stages, results in a wider range of stress variation. In other words, at lower rates, stress release occurs gradually and gently, whereas at higher rates, stress relaxation is faster and more pronounced in the initial loading stages. This trend clearly reflects the viscoelastic nature of the composite layer and the time-dependent behavior of the material. Overall, analysis of the data at loading rates of 50, 100, and 200 mm/min shows that increasing the loading rate accelerates stress relaxation in the initial stages, while increasing the number of loading stages leads to gradual and cumulative stress reduction in subsequent stages. In all cases, after a certain period, the curves approach a stable region, indicating a relative equilibrium of stress within the composite structure.



**Figure 2. Specimen in the tensile testing machine**

**Table 2. Final normalized stress at the end of relaxation obtained under different loading rates and stepwise loading conditions**

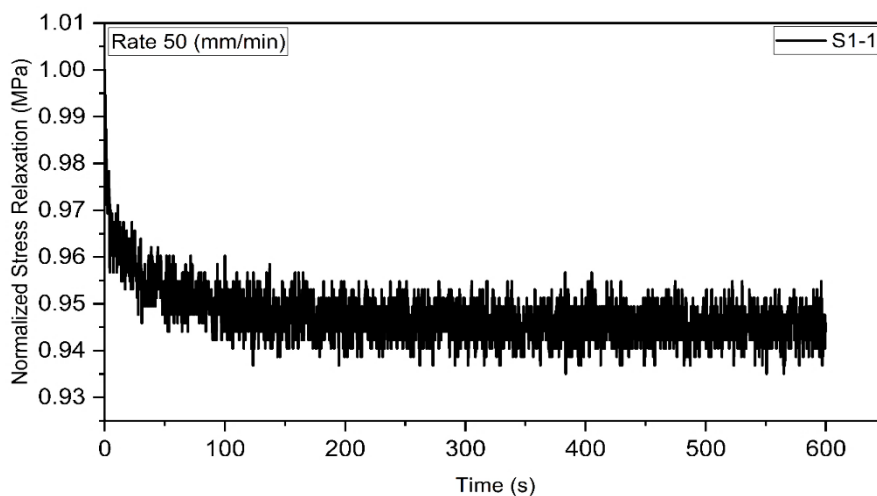
Loading Rate (mm/min)	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
50 (Single Step)	5.41	-	-	-
50 (Two Step)	6.34	6.65	-	-
50 (Three Step)	4.08	5.44	8.88	-
100 (Single Step)	4.63	-	-	-
100 (Two Step)	5.44	7.13	-	-
100 (Three Step)	5.83	5.67	7.46	-
100 (Four Step)	7.004	6.03	6.65	7.44
200 (Four Step)	6.32	5.86	6.53	9.34

### 3.1. Relaxation Behavior at a Loading Rate of 50 mm/min

The stress behavior at a loading rate of 50 mm/min exhibits slow and gradual characteristics. The minimum and maximum stress values are presented in Table 3, and the normalized plots are shown in Figures 3 to 5. In the single-step test (S1-1), the stress started at a maximum value of approximately 0.448 MPa and gradually decreased to a final normalized value of 5.41%. This reduction over the course of the test indicates a gradual release of residual stresses within the resin layer. According to Table 3, in the two-step tests (S2-1 and S2-2), the stress variation range increased, with a maximum stress reaching approximately 3.568 MPa. The final normalized stress values were recorded as 6.34% and 6.65%, respectively, indicating a greater stress drop compared to the single-step test. This behavior can be attributed to molecular rearrangement within the composite matrix during the 10-minute pause between steps, leading to a redistribution of stress between the fibers and the adhesive. In the three-step tests (S3-1 to S3-3), cumulative stress relaxation continued more intensely. As shown in Figure 5, the maximum stress in this case was 4.552 MPa, and the final normalized stress values reached 4.08%, 5.41%, and 8.88%, respectively. These results indicate that after the third stage, the structure approaches a quasi-stable state and stress relaxation reaches its saturation limit. The trend at 50 mm/min demonstrates that at low loading rates, stress relaxation begins gradually and intensifies in subsequent steps. This behavior reflects effective control of the internal mechanisms of stress absorption within the polymer layer and preservation of interlayer adhesion during the loading process.

**Table 3. Maximum and minimum stress and force values for different loading conditions at a loading rate of 50 mm/min**

Loading Rate (mm/min)	Step Code	Maximum Stress (MPa)	Minimum Stress (MPa)	Maximum Force (N)	Minimum Force (N)
50	S1-1	0.448487	0.058294	3396.7	441.5
50	S2-1	1.083978	0.000805	8209.7	6.1
50	S2-2	3.56849	1.784245	27026.6	13513.3
50	S3-1	1.60695	0.00729	12170.5	6.1
50	S3-2	3.230094	1.542183	24463.7	11680
50	S3-3	4.55208	3.051185	34476	23108.7

**Figure 3. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 50 mm/min in a single step**

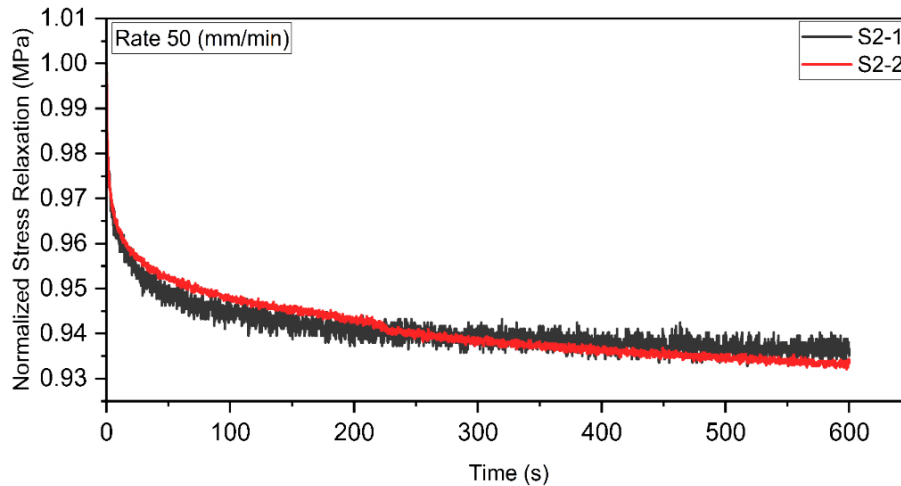


Figure 4. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 50 mm/min under two-step loading

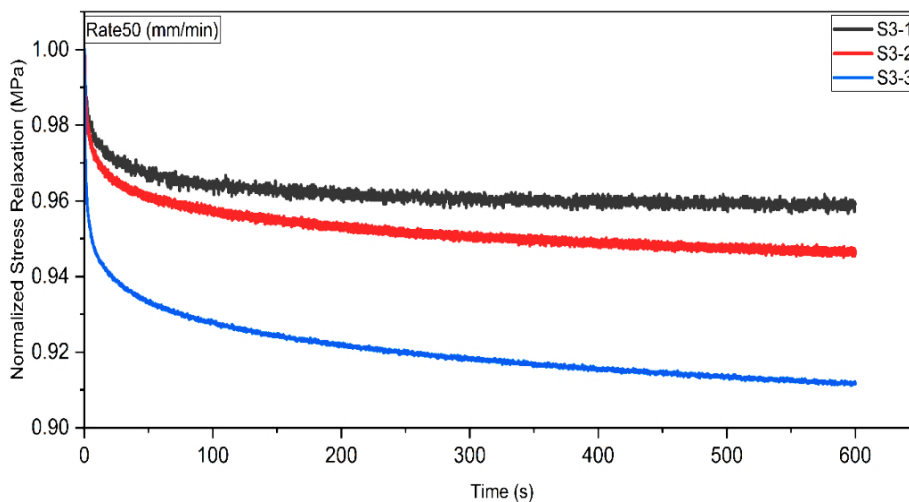


Figure 5. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 50 mm/min under three-step loading

### 3.2. Relaxation Behavior at the Loading Rate of 100 mm/min

The overall behavior at the medium loading rate of 100 mm/min indicates that the system tends to stabilize stress more effectively after each loading step, and the relaxation mechanisms operate more uniformly. This characteristic is desirable in composite structures, as it reflects stress stability under cyclic loading. At this rate, the system behavior is more balanced and smoother compared to the 50 mm/min case. Data from Table 4 and plots in Figures 6 to 9 clearly illustrate this trend. In the single-step test (S1-1), the maximum stress reached 1.435 MPa, and the final normalized value was 0.4963%, slightly higher than the corresponding value at 50 mm/min. This suggests that with increasing loading rate, more elastic energy is stored in the structure during the initial phase, while stress relaxation occurs more rapidly. In the two-step tests (S2-1 and S2-2), the maximum stress increased to 2.313 MPa, and the final normalized stress values were recorded as 5.43% and 7.13%, respectively. Figure 7 shows that in the second stage, the stress drop continued with a gentler slope before reaching a stable state. In the three-step tests (S3-1 to S3-3), stress relaxation became more uniform and stable, with final normalized values of 5.83%, 5.67%, and 7.46%. These results indicate that the system approaches a more stable state compared to the 50 mm/min rate. As shown in Figure 9, in the four-step tests (S4-1 to S4-4), the final normalized stress values in the four steps were 7.004%, 6.03%, 6.65%, and 7.44%, respectively. It is observed that stress reduction in steps two through four is more gradual and occurs over a smaller range, reflecting an internal balance within the structure.

Table 4. Maximum and minimum stress and force values for different loading conditions at a loading rate of 100 mm/min

Loading Rate (mm/min)	Step Code	Maximum Stress (MPa)	Minimum Stress (MPa)	Maximum Force (N)	Minimum Force (N)
100	S1-1	1.435326	0.003235	10870.7	24.5
100	S2-1	1.221612	0.002429	9552.1	18.4
100	S2-2	2.313684	1.154419	17523.1	8743.2
100	S3-1	0.73507	0.00081	5567.2	6.1
100	S3-2	1.78424	0.68973	13513.3	5223.8
100	S3-3	2.971039	1.682234	22501.7	12740.7
100	S4-1	0.289014	0.003235	2188.9	24.5
100	S4-2	0.978745	0.269578	7412.7	2041.7
100	S4-3	1.836056	0.975592	13905.7	6934.4
100	S4-4	2.541169	1.710569	19246	12955.3

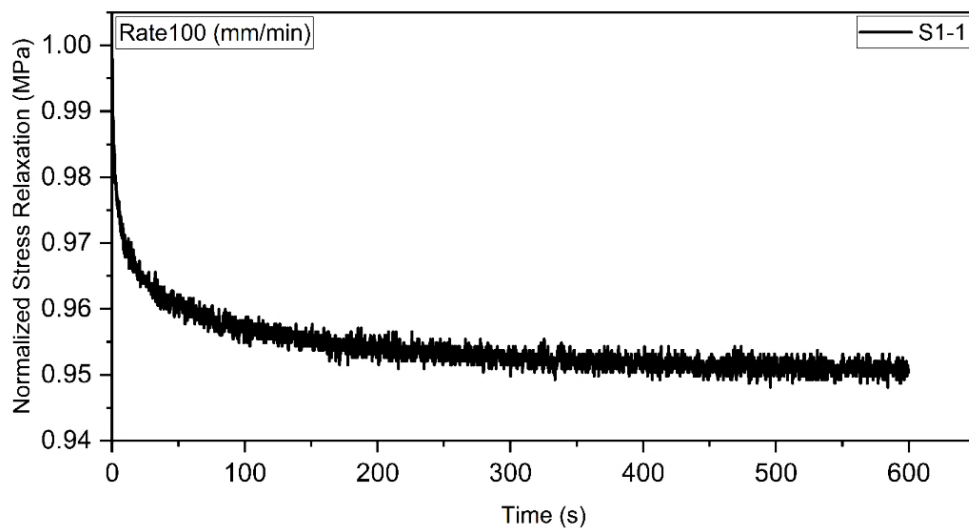


Figure 6. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 100 mm/min in a single step

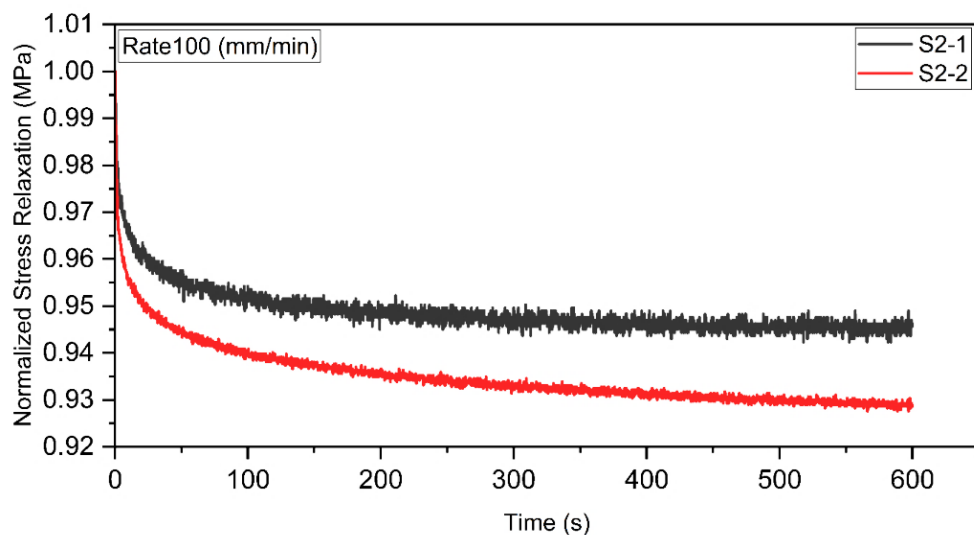


Figure 7. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 100 mm/min under two-step loading

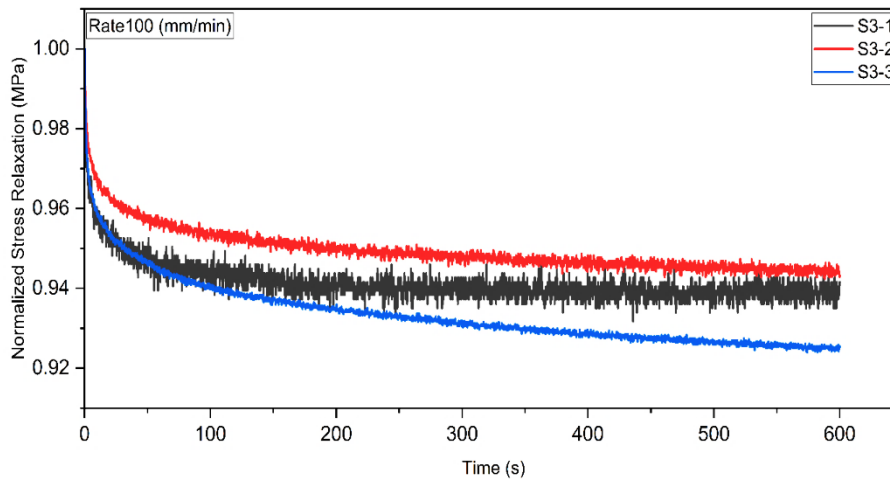


Figure 8. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 100 mm/min under three-step loading

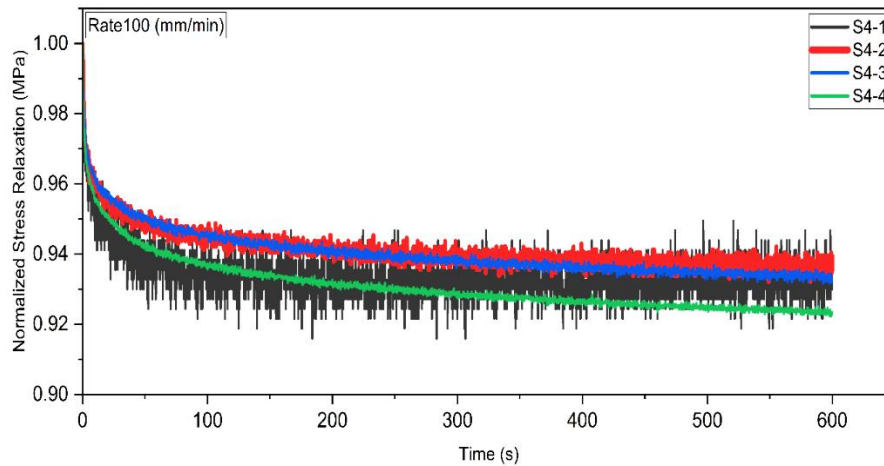


Figure 9. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 100 mm/min under four-step loading

### 3.3. Relaxation Behavior at the Loading Rate of 200 mm/min

At the high loading rate of 200 mm/min, stress relaxation and redistribution occurred much more intensely. Table 5 shows that in the first step (S4-1), the minimum stress was only 0.00162 MPa, while the maximum reached 0.72941 MPa, indicating extremely rapid stress release during the initial seconds of loading. In the second and third steps, the stress range increased, with maximum values reaching 1.82285 MPa and 2.71198 MPa, respectively. Finally, in the fourth step (S4-4), the peak stress reached 3.46567 MPa, while the final normalized stress dropped to 9.34%, which, as shown in Figure 10, represents the lowest stable stress among all the tested steps. This behavior at high rates can be attributed to faster activation of interlayer slip mechanisms, increased local strains, and accelerated rearrangement of polymer chains. Essentially, at high loading rates, the viscoelastic material does not have sufficient time to adapt, leading to a more sudden stress release. Moreover, as the number of steps increases, the composite structure tends to soften, and by the end of the fourth step, the curves approach a stable state. This trend reflects a rate-dependent fatigue-like behavior, which is particularly significant for offshore structures or systems subjected to fluctuating environmental loads.

Table 5. Maximum and minimum stress and force values for different loading conditions at a loading rate of 200 mm/min

Loading Rate (mm/min)	Step Code	Maximum Stress (MPa)	Minimum Stress (MPa)	Maximum Force (N)	Minimum Force (N)
200	S4-1	0.72941	0.00162	5524.3	12.3
200	S4-2	1.82285	0.678402	13801.4	5138
200	S4-3	2.711984	1.710569	20539.7	12955.3
200	S4-4	3.46567	2.53388	26247.9	19190.8

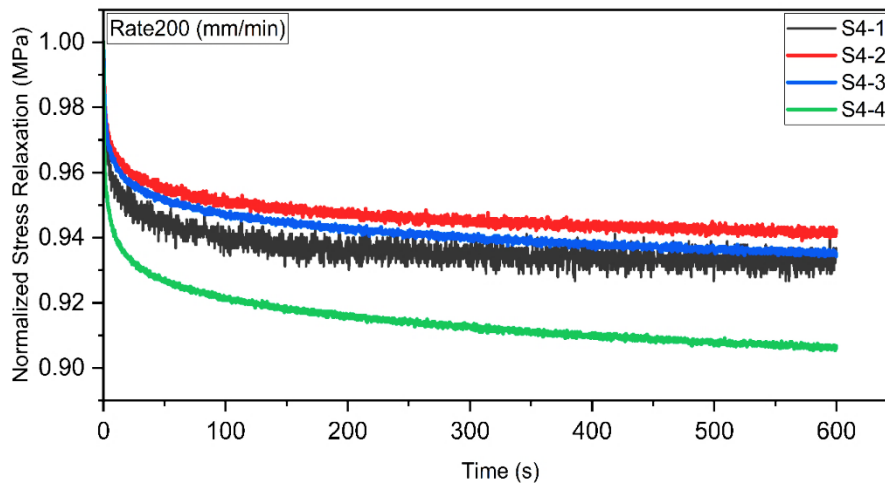


Figure 10. Stress relaxation curve over time at a loading rate of 100 mm/min under four-step loading

#### 4. Discussion and Conclusion

The stress relaxation behavior of GFRP reinforced steel composite systems demonstrated that the structural response is directly influenced by the viscoelastic characteristics of the epoxy resin, the loading history, and the number of applied loading steps. The experimental results clearly showed that the most pronounced stress reduction occurs within the initial minutes of each stage, after which the system gradually approaches a quasi-stable state behavior attributed to the progressive molecular rearrangement within the polymer matrix. Increasing the loading rate led to higher initial stresses and consequently more pronounced stress decay during the hold period, as the epoxy has insufficient time to release stored energy under rapid loading. Conversely, at lower loading rates, the initial stress was smaller and the relaxation process slower yet more persistent, indicating the dominance of long-term viscoelastic behavior over the immediate elastic response.

The number of loading stages also played a significant role in amplifying stress relaxation. The three-step and four-step specimens experienced approximately 4–7% greater total stress reduction compared to the single-step case. This observation indicates that intermediate rest periods provide favorable conditions for releasing residual energy in the adhesive layer and redistributing stresses, thereby guiding the system toward structural equilibrium. In effect, each dwell period promotes additional relaxation in the resin matrix and alters the stress-transfer pathway between layers.

From a mechanical standpoint, these changes are not limited to stress reduction but directly influence the mechanisms of failure initiation and propagation. The observed failure at the steel–composite interface highlights the governing role of the adhesive’s time-dependent behavior in stress concentration and in defining the system’s ultimate capacity. This becomes particularly critical in real pipeline applications, where loading typically exhibits fluctuating, gradual, or multistage patterns. Under such conditions, stress relaxation may shift the critical region, modify failure mechanisms, and change the stress-transfer pattern over time factors which, if ignored, can lead to significant errors in predicting structural life and stability.

These findings underscore the necessity of explicitly incorporating epoxy viscoelasticity and stepwise loading effects into numerical modeling, time-dependent simulations, and practical design of reinforced systems, especially in marine and subsea applications where structures are exposed to load variations over multiple time scales. Accordingly, the data obtained in this study can serve as a basis for calibrating more advanced models and developing reinforcement strategies with improved long-term durability. The key findings can be summarized as follows:

- The most significant stress reduction occurred during the initial minutes of each stage, followed by a gradual approach toward a quasi-stable state.
- Higher loading rates resulted in increased initial stress and faster stress relaxation.
- At lower loading rates, stress relaxation was slower but more persistent, indicating the dominance of viscoelastic behavior.

- Increasing the number of loading stages led to a 4–7% increase in overall stress reduction compared to the single-step case.
- Intermediate dwell periods facilitated molecular rearrangement within the resin and stress redistribution within the adhesive and intermediate layers.
- Failure occurred at the steel–composite interface, emphasizing the critical influence of the adhesive in stress concentration and time-dependent behavior.
- Stress relaxation can alter failure mechanisms and shift regions of stress concentration.
- Viscoelasticity and stepwise loading must be explicitly incorporated in structural design and modeling, particularly for pipelines and marine applications.



## تحلیل وابسته به زمان رفتار لوله‌های فولادی تقویت‌شده با GFRP تحت اثر بارگذاری مرحله‌ای و استراحت تنش

رامین بیرانوند الف، مهدی انصاری ب\*

الف دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران،

[raminbeyranvand2000@gmail.com](mailto:raminbeyranvand2000@gmail.com)

ب\* استادیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، [Ansari@arakut.ac.ir](mailto:Ansari@arakut.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این پژوهش، رفتار زمانی و استراحت تنش لوله‌های فولادی بدون درز API-X42 تقویت‌شده با کامپوزیت الیاف شیشه مورد مطالعه قرار گرفت تا اثرات وابسته به زمان بر پایداری و ظرفیت باربری سیستم بررسی شود. پوشش کامپوزیتی لایه‌ای E-glass با رزین اپوکسی بر روی ناحیه اتصال لوله‌ها اعمال شد. آزمایش کشش به صورت تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای با توقف ۱۰ دقیقه‌ای در هر مرحله انجام شد و داده‌های تنش-زمان به صورت نرمال شده ثبت گردید. نتایج نشان داد که نرخ پایین پیشروی موجب آزادسازی تدریجی تنش و پایداری طولانی‌تر سیستم می‌شود، درحالی‌که نرخ‌های بالاتر باعث آزادسازی سریع‌تر تنش‌ها و رسیدن به وضعیت پایدار در مراحل اولیه می‌گردد. همچنین، افزایش تعداد مراحل بارگذاری منجر به کاهش تجمعی تنش و نزدیک شدن رفتار سیستم به حالت شبه‌پایدار شد. در نرخ‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار نهایی استراحت تنش به ترتیب ۸/۹، ۷/۷ و ۹/۴ درصد ثبت شد. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش کلیدی ویسکوالاستیسیته رزین و توزیع تنش بین الیاف و فلز در پایداری مکانیکی سیستم است و اهمیت بررسی رفتار زمانی در طراحی و پیش‌بینی عملکرد بلندمدت لوله‌های فولادی تقویت‌شده را تأیید می‌کند. نتایج این پژوهش راهنمایی روشن برای مطالعات آینده ارائه می‌دهد تا تأثیر بارگذاری چندمرحله‌ای و مکانیزم‌های شکست نهایی در سیستم‌های ترکیبی فولاد-کامپوزیت به‌طور جامع بررسی شود.</p>	<p>کامپوزیت، GFRP، بارگذاری مرحله‌ای، استراحت تنش.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱</p>

### ۱- مقدمه

لوله‌های فولادی به‌عنوان اجزای بنیادی در صنایع استراتژیک از جمله صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و سامانه‌های انتقال انرژی، نقش حیاتی در تضمین عملکرد پایدار زیرساخت‌ها و تأمین انرژی جهانی ایفا می‌کنند. اهمیت این سازه‌ها تنها به انتقال مایعات و گازها محدود نمی‌شود؛ بلکه عملکرد قابل‌اعتماد آن‌ها مستقیماً با بهره‌وری اقتصادی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، و حفاظت از محیط‌زیست مرتبط است. شبکه‌های گسترده خطوط لوله زیرزمینی و زیرآبی، که در بسیاری از مناطق جغرافیایی برای انتقال انرژی استفاده می‌شوند، در معرض طیف وسیعی از عوامل تهدیدکننده قرار دارند که می‌تواند موجب خرابی زود هنگام و کاهش ایمنی آن‌ها شود [۱، ۲]. از جمله این عوامل می‌توان به خوردگی ناشی از محیط‌های خورنده، فشارهای داخلی بالا، بارهای مکانیکی تکرار شونده، تغییرات دمایی و ضربه‌های فیزیکی اشاره کرد [۳، ۴]. ترکیب این اثرات منجر به کاهش تدریجی ضخامت دیواره، ایجاد ترک‌های سطحی و عمقی، و نهایتاً شکست ناگهانی لوله‌ها می‌شود. بررسی گزارش‌های صنعتی نشان می‌دهد که هزینه‌های

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۶۳۳۴۰۰۶۹۶

آدرس پست الکترونیک: [ansari@arakut.ac.ir](mailto:ansari@arakut.ac.ir)

ناشی از خرابی خطوط لوله، شامل توقف تولید، تعمیرات اضطراری و آثار زیست‌محیطی، بسیار چشمگیر است و ضرورت توسعه روش‌های پیشگیرانه و پایدار برای افزایش طول عمر این سازه‌ها را از پیش برجسته می‌سازد [۵].

روش‌های سنتی تعمیر و تقویت لوله‌های فولادی، شامل تعویض بخش‌های آسیب‌دیده، جوشکاری و نصب آستری‌های فلزی، علی‌رغم کارایی محدود، با چالش‌های اجرایی و اقتصادی مهمی همراه هستند. در محیط‌های دریایی و زیرآبی، این روش‌ها نیازمند عملیات پیچیده، استفاده از تجهیزات سنگین و توقف طولانی‌مدت بهره‌برداری هستند [۲، ۶]. علاوه بر این، محدودیت‌های اجرایی و هزینه‌های بالای نیروی انسانی و تجهیزات باعث شده است که پژوهش‌ها و تلاش‌های صنعتی به سمت روش‌های جایگزین و کم‌هزینه‌تر سوق پیدا کنند. در این میان، استفاده از مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف (FRP) به‌عنوان یک راهکار نوین و مؤثر مطرح شده است [۱، ۲]. برای تکمیل دیدگاه‌های مواد کامپوزیتی و نشان دادن گستره تحقیقات اخیر در زمینه‌ی پلیمرهای ترموپلاستیک، چند مطالعه مرتبط با کاربردهای بایوکامپوزیت‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷-۱۰]. این سیستم‌های تقویت‌شده با ویژگی‌هایی مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن سبک، سهولت نصب، و قابلیت بازگرداندن ظرفیت باربری بدون توقف طولانی بهره‌برداری، جایگاه ویژه‌ای در تعمیر و تقویت لوله‌ها یافته‌اند [۱، ۲، ۴]. به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد این مواد، سیستم‌های تقویت FRP به‌عنوان یکی از نویدبخش‌ترین فناوری‌ها برای ترمیم و افزایش دوام لوله‌های فولادی در محیط‌های دریایی و صنعتی شناخته شده‌اند [۱، ۲، ۶].

تحقیقات گسترده‌ای به بررسی اثربخشی سیستم‌های کامپوزیتی در بهبود رفتار مکانیکی لوله‌های فولادی پرداخته‌اند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی می‌تواند ظرفیت نیرویی لوله‌ها را افزایش دهد [۴، ۵]، مقاومت آن‌ها در برابر رشد ترک و خستگی را بهبود بخشد [۱۱، ۱۲] و تمرکز تنش در نواحی آسیب‌دیده را کاهش دهد [۶، ۱۳]. علاوه بر نتایج تجربی، مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزای محدود، به‌طور گسترده برای پیش‌بینی رفتار لوله‌های تقویت‌شده به کار گرفته شده است [۱۴، ۱۵]. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های اجزای محدود می‌توانند روند کلی رفتار مکانیکی لوله‌ها را با دقت نسبتاً بالا پیش‌بینی کنند و نتایج آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارد [۱۴، ۱۵]. علاوه بر این، اثر متغیرهای طراحی و ساخت مانند نوع الیاف، زاویه لایه‌گذاری، ضخامت تقویت، خواص پرکننده و شرایط محیطی، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سیستم‌های تقویت‌شده ایفا می‌کنند [۳، ۴، ۱۶]. به‌ویژه، شرایط محیطی مانند آب دریا می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر دوام مکانیکی و ظرفیت باربری سیستم‌های تقویت‌شده داشته باشد [۱۶].

با وجود حجم گسترده پژوهش‌ها در زمینه‌ی تقویت لوله‌های فولادی با کامپوزیت، بیشتر مطالعات بر رفتار کوتاه‌مدت و لحظه‌ای تمرکز دارند و توجه محدودی به رفتار وابسته به زمان شده است. در واقعیت بهره‌برداری، لوله‌ها تحت بارگذاری‌های پیچیده و وابسته به زمان قرار می‌گیرند که شامل بارهای متناوب، تکرار شونده و مرحله‌ای است. دو پدیده مهم وابسته به زمان که در مواد پلیمری و کامپوزیتی بسیار برجسته هستند، خزش و ریلکسیشن تنش هستند. ریلکسیشن ناشی از طبیعت ویسکوالاستیک ماتریس‌های پلیمری و تعامل آن‌ها با الیاف تقویتی است. در سیستم‌های تقویت لوله، انتقال بار میان لایه‌های فولادی و کامپوزیتی از طریق چسب و رزین صورت می‌گیرد و بروز پدیده ریلکسیشن می‌تواند توزیع تنش در ناحیه اتصال را تغییر داده و ظرفیت باربری نهایی را تحت تأثیر قرار دهد [۶، ۱۷]. همچنین، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که حتی در پلیمرهای ترموست مانند اپوکسی، ساختار شبکه و تکامل درجه پخت بر زمان‌های استراحت تنش و خزش تأثیر دارد و پاسخ ویسکوالاستیک مواد در شرایط بارگذاری طولانی‌مدت همچنان ادامه دارد، که این امر در تحلیل عملکرد بلندمدت لوله‌های تقویت‌شده اهمیت ویژه دارد [۱۸].

اهمیت بررسی استراحت تنش زمانی بیشتر می‌شود که توجه کنیم بارگذاری‌ها در محیط‌های صنعتی و دریایی اغلب به‌صورت مرحله‌ای یا متناوب اعمال می‌شوند و کمتر یک‌مرحله‌ای و لحظه‌ای هستند [۱۱، ۱۲، ۱۹]. شرایط محیطی و نیروهای متغیر، فرصت کافی برای بروز اثرات استراحت تنش در هر مرحله بارگذاری ایجاد می‌کند و غفلت از آن می‌تواند منجر به تفاوت قابل‌توجهی بین نتایج آزمایش‌های استاندارد و عملکرد واقعی سیستم تقویت‌شده شود. باین‌حال، مرور ادبیات نشان می‌دهد که علی‌رغم توجه به ظرفیت نهایی، خستگی و دوام محیطی، مطالعات مستقیم درباره اثر استراحت تنش در لوله‌های فولادی تقویت‌شده محدود هستند. این خلأ علمی، اهمیت بررسی اثرات وابسته به زمان را دوچندان می‌کند. پژوهش‌های مشابه نشان

داده‌اند که رفتار استراحت تنش میله‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) و به‌ویژه میله‌های بازالت تقویت‌شده با الیاف (BFRP) در کاربردهای دریایی و پیش‌تندگی اهمیت ویژه‌ای دارد. در یک مطالعه، رفتار بلندمدت استراحت تنش میله‌های BFRP تحت سطوح تنش اولیه و شرایط محیطی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که رفتار استراحت تنش این میله‌ها با لگاریتم زمان رابطه خطی دارد و به سطح تنش اولیه وابسته است. اثر محیط دریایی آب دریا، اندک بوده و میله‌ها برای استفاده در سازه‌های دریایی مناسب تشخیص داده شدند، درحالی‌که شرایط اسیدی و قلیایی باعث افزایش تغییرات استراحت تنش و حتی شکست میله‌ها تحت همان سطح تنش شد. کاهش تنش پیش‌بینی‌شده پس از یک میلیون ساعت بین ۷/۷۶ درصد تا ۱۳/۷۵ درصد بود و حضور آب دریا این مقدار را به حدود ۱۶/۱۳ درصد افزایش داد [۲۰]. شناسایی وجود و میزان استراحت تنش در لوله‌های فولادی تقویت‌شده، از منظر علمی و صنعتی اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند به بهبود طراحی سیستم‌های تقویت، افزایش قابلیت اطمینان و پیش‌بینی عملکرد آن‌ها در شرایط عملیاتی واقعی کمک کند.

پژوهش حاضر با ایجاد شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده، سعی دارد اثر پدیده استراحت تنش بر کاهش نیرو و رفتار وابسته به زمان لوله‌های فولادی تقویت‌شده با کامپوزیت را به‌طور جامع بررسی کند. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر ظرفیت نهایی یا رفتار کوتاه‌مدت سیستم تمرکز داشته‌اند، این مطالعه به‌صورت سیستماتیک تأثیر بارگذاری مرحله‌ای و رفتار وابسته به زمان را در نرخ‌های مختلف بارگذاری و شرایط شبیه‌سازی‌شده عملیاتی مورد بررسی قرار می‌دهد. نوآوری اصلی پژوهش در این است که با ثبت تغییرات نیرو و استراحت تنش در طول زمان، بینشی عمیق از نحوه توزیع تنش، اثر توقف‌های زمانی و تغییرات تجمعی تنش در لایه‌های کامپوزیتی ارائه می‌دهد، مسائلی که در مطالعات قبلی به‌صورت محدود یا مقطعی مورد توجه بوده‌اند. نتایج این تحقیق نه‌تنها درک علمی دقیق‌تری از رفتار ویسکوالاستیک رزین و تعامل آن با الیاف شیشه در سیستم‌های فولاد-کامپوزیت فراهم می‌کند، بلکه اهمیت کاربردی قابل‌توجهی نیز دارد؛ این داده‌ها می‌توانند به بهبود طراحی سیستم‌های تقویت، پیش‌بینی دوام و ظرفیت شکست طولانی‌مدت و بهینه‌سازی نگهداری خطوط لوله صنعتی و دریایی کمک کنند. به‌این‌ترتیب، پژوهش حاضر با ارائه رویکردی جامع و کاربردی، خلأ علمی موجود در بررسی اثرات وابسته به زمان و استراحت تنش در لوله‌های فولادی تقویت‌شده را پر می‌کند و مسیر تحقیقات آتی را به‌روشنی مشخص می‌سازد.

## ۲- مواد و روش ساخت

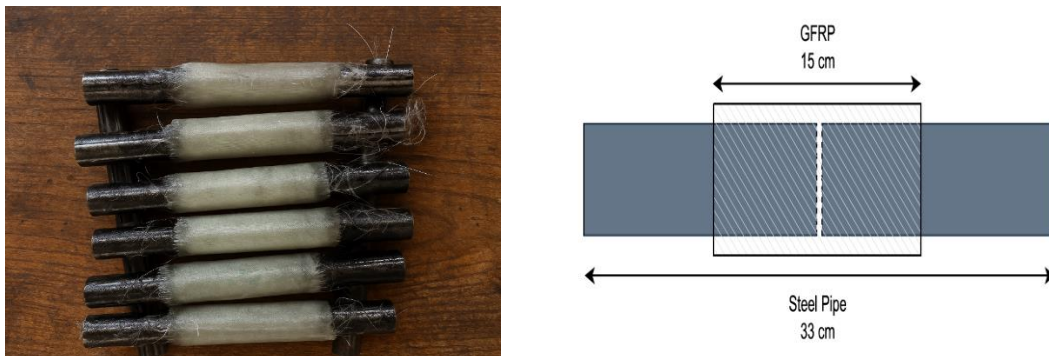
### ۲-۱- مواد

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های تقویت‌شده از لوله‌های فولادی بدون درز API-X42 با قطر نامی ۱ اینچ تنش تسلیم ۲۸۹ مگاپاسکال و مدول یانگ ۲۱۰ گیگاپاسکال استفاده شد. این نوع لوله به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، از جمله استحکام کششی مناسب، شکل‌پذیری خوب و مقاومت قابل‌اعتماد در برابر فشار داخلی، در صنایع نفت و گاز کاربرد گسترده‌ای دارد. انتخاب نوع بدون درز به دلیل ساختار یکنواخت‌تر، استحکام بالاتر و کاهش احتمال نشت یا ترک در محل اتصال صورت گرفت و آن را به گزینه‌ای ایمن برای عملیات تقویتی تبدیل کرد. برای لایه‌گذاری تقویتی از رزین اپوکسی LR620 با مدول یانگ ۳ گیگاپاسکال استفاده شد که به‌طور ویژه برای فرآیند لایه‌گذاری دستی طراحی شده است. این رزین با داشتن چسبندگی بالا به سطح فلز، مقاومت شیمیایی مناسب و ویسکوزیته مطلوب برای آغشته‌سازی الیاف، امکان ایجاد پوششی مستحکم و یکنواخت بر روی سطح لوله را فراهم می‌کند و از نظر پایداری مکانیکی در شرایط محیطی نسبت به دیگر رزین‌های رایج برتری دارد. الیاف تقویتی به‌کاررفته از نوع الیاف شیشه‌ای E-glass با وزن ۲۰۰ گرم بر متر مربع، مدول یانگ ۷۲ گیگاپاسکال و بافت ۸×۷ انتخاب شد. این پارچه شیشه‌ای با ساختار منظم و تراکم مناسب تار و پود، استحکام کششی مطلوب، انعطاف‌پذیری کافی و قابلیت جذب مناسب رزین را فراهم می‌آورد و موجب توزیع یکنواخت تنش در لایه کامپوزیتی می‌شود.

### ۲-۲- روش ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا لوله‌های فولادی API-X42 به طول ۱۶۵ میلی‌متر برش داده شدند و سطوح دو سر هر قطعه به‌صورت یکنواخت سنگ‌زنی و سنباده‌زنی شدند تا زبری کنترل‌شده و سطحی مناسب برای چسبندگی ایجاد گردد. سپس دو

سر لوله پس از پاک‌سازی کامل با تینر و استون، به‌وسیله چسب اپوکسی با استحکام بالا به یکدیگر متصل شدند تا پیوستگی لازم برای اجرای پوشش فراهم شود. عملیات پوشش‌دهی با روش لایه‌گذاری دستی انجام گرفت؛ به این منظور رزین اپوکسی LR620 و هاردنر مطابق دستورالعمل شرکت سازنده با نسبت وزنی ۱۰ به ۲ میلی‌لیتر مخلوط و پس از هم‌زدن یکنواخت، ابتدا به‌صورت یک لایه روی سطح آماده‌شده اعمال شد. سپس پارچه شیشه‌ای با ضخامت تقریبی ۰/۲ میلی‌متر در هر لایه، پس از آغشته شدن کامل به رزین، به‌صورت متوالی بر روی سطح اتصال قرار گرفت تا پوششی یکپارچه ایجاد شود. ناحیه تقویتی شامل ۷۵ میلی‌متر از انتهای لوله اول و ۷۵ میلی‌متر از ابتدای لوله دوم بود و طول کل پوشش برابر ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا محل اتصال دقیقاً در مرکز پوشش قرار گیرد. در تمامی نمونه‌ها ۱۵ لایه الیاف اعمال گردید که با توجه به ضخامت هر لایه، ضخامت نهایی پوشش تقویتی حدود ۳ میلی‌متر حاصل شد. در شکل ۱ - الف تصویر شماتیک لوله فولادی و ناحیه پوشش داده شده با GFRP و در ۱ - ب تصویر نمونه‌های پوشش داده شده نشان داده شده است.



شکل ۱ (الف) تصویر شماتیک لوله فولادی پوشش داده شده با GFRP (ب) لوله‌های پوشش داده شده با GFRP

## ۲-۳- طراحی آزمایش

به‌منظور بررسی دقیق رفتار مکانیکی لوله‌های فولادی پوشش‌دهی شده با GFRP و تحلیل روند استراحت تنش ناشی از پدیده استراحت، آزمایش کشش به‌صورت کنترل‌شده و با بارگذاری تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای طراحی شد. فلسفه اصلی این طراحی، شبیه‌سازی شرایط واقعی بهره‌برداری است، جایی که سازه‌های دریایی و خطوط لوله زیرآبی به‌ندرت تحت بارگذاری لحظه‌ای و یکنواخت قرار می‌گیرند و اغلب نیروها به‌صورت مرحله‌ای و با فواصل زمانی مشخص اعمال می‌شوند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در طول دوره‌ی عملیاتی، خطوط لوله فولادی دریایی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند که علاوه بر ایجاد آسیب خستگی، موجب خوردگی نیز می‌شود و تحلیل رفتار ترک‌خوردگی وابسته به زمان برای ارزیابی یکپارچگی ساختاری ضروری است [۲۱]. چنین طراحی، امکان بررسی تأثیر توقف‌های زمانی بر کاهش نیرو و توزیع تنش در لایه‌های کامپوزیتی را فراهم می‌آورد و رفتار واقعی سیستم تحت شرایط محیطی و بارگذاری عملیاتی را شبیه‌سازی می‌کند.

ابتدا، یک پیش‌آزمایش برای تعیین بیشینه جابجایی قبل از شکست نمونه‌ها انجام شد. در این آزمایش، جابجایی شکست لوله تقویت‌شده مشخص شد که مقدار آن ۳/۳۲ میلی‌متر بود. با توجه به این مقدار، جابجایی ۳ میلی‌متر به‌عنوان مرجع بارگذاری در آزمایش‌های اصلی انتخاب شد تا نمونه‌ها در محدوده ایمن عملکردی قرار گیرند و امکان بررسی مرحله‌ای استراحت تنش فراهم شود. بارگذاری مرحله‌ای به چهار حالت طراحی شد تا اثر تعداد مراحل و توقف‌های بین آن‌ها بر تغییرات تنش و رفتار استراحت تنش تحلیل گردد.

- بارگذاری تک‌مرحله‌ای (S1) شامل یک مرحله کشش با جابجایی ۱ میلی‌متر و توقف ۱۰ دقیقه‌ای پس از رسیدن به این جابجایی.
- بارگذاری دو مرحله‌ای (S2) شامل دو مرحله کشش متوالی، هر مرحله به میزان ۱ میلی‌متر، با توقف ۱۰ دقیقه‌ای بین مراحل (S2-1 و S2-2).
- بارگذاری سه مرحله‌ای (S3) شامل سه مرحله کشش متوالی، هر مرحله به میزان ۱ میلی‌متر، با توقف ۱۰ دقیقه‌ای بین

مراحل (S3-1 تا S3-3).

- بارگذاری چهار مرحله‌ای (S4) شامل چهار مرحله کشش متوالی، هر مرحله به میزان ۰/۷۵ میلی‌متر، با توقف ۱۰ دقیقه‌ای بین مراحل (S4-1 تا S4-4).

این تقسیم‌بندی مرحله‌ای که بر اساس پیش‌آزمون‌های انجام شده، ظرفیت جابجایی نمونه‌ها و ضرورت ایجاد سطوح متفاوت تنش برای بررسی روند استراحت تنش انجام شد، شرایط بارگذاری‌های متغیر و واقعی را شبیه‌سازی می‌کند، جایی که نیرو ممکن است به صورت ناگهانی یا تدریجی اعمال شود و مدت‌زمان توقف بین مراحل اجازه بروز اثر استراحت تنش را می‌دهد. در هر مرحله، داده‌های نیرو - جابجایی با استفاده از دستگاه کشش STM-250 ثبت شد و با توجه به زمان اعمال شده برای مراحل بارگذاری نرمال‌سازی داده‌ها انجام شد، نرمال‌سازی تنش با تقسیم مقادیر تنش بر تنش ماکزیمم انجام شد. نرمال‌سازی تنش باعث شد تا امکان تحلیل دقیق میزان استراحت تنش و اثر آن بر ظرفیت باربری لوله‌ها فراهم شود. همچنین، برای بررسی تأثیر نرخ بارگذاری بر رفتار استراحت تنش، آزمایش‌ها در سه سرعت متفاوت انجام شد: ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه. سرعت‌های انتخاب شده با پژوهش Stochioiu و همکاران تطابق داشت [۲۲]. این انتخاب نرخ‌های مختلف، امکان تحلیل اثر سرعت اعمال بار بر مقدار کاهش نیرو و زمان‌بندی استراحت تنش را فراهم می‌آورد و می‌تواند برای طراحی مهندسی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌ها در شرایط عملیاتی واقعی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱، طرح کلی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد و ترکیب مراحل بارگذاری و نرخ‌های مختلف را به صورت منظم ارائه می‌کند. این جدول بیانگر چهار حالت بارگذاری مرحله‌ای و تأثیر نرخ‌های مختلف بر فرآیند استراحت تنش است و مبنای تحلیل عمیق رفتار استراحت تنش در بخش نتایج مقاله قرار می‌گیرد.

جدول ۱ طراحی آزمایش انجام شده

نرخ پیشروی (mm/min)	نوع بارگذاری	کد مراحل	زمان توقف در هر مرحله (min)
۵۰	تک مرحله‌ای	S1-1	۱۰
۵۰	دو مرحله‌ای	S2-1 ، S2-2	۱۰
۵۰	سه مرحله‌ای	S3-1-S3-3	۱۰
۱۰۰	تک مرحله‌ای	S1-1	۱۰
۱۰۰	دو مرحله‌ای	S2-1 ، S2-2	۱۰
۱۰۰	سه مرحله‌ای	S3-1-S3-3	۱۰
۱۰۰	چهار مرحله‌ای	S4-1-S4-4	۱۰
۲۰۰	چهار مرحله‌ای	S4-1-S4-4	۱۰

### ۳- نتایج

به منظور ارزیابی دقیق رفتار استراحت تنش، مجموعه‌ای از آزمایش‌های کشش مرحله‌ای با نرخ‌های بارگذاری مختلف انجام شد. در شکل ۲ تصویر نمونه در دستگاه آزمایش کشش نشان داده شده است همچنین نتایج به صورت نرمال شده در جدول ۲ ارائه گردید تا امکان مقایسه مستقیم میان حالت‌های بارگذاری و نرخ‌های پیشروی فراهم شود. پیش از تحلیل نمودارهای نرمال شده، داده‌های خام شامل مقادیر کمینه و بیشینه تنش در هر مرحله بارگذاری در جداول ۳ تا ۵ گزارش شده‌اند. این داده‌ها تصویری دقیق از رفتار واقعی لایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری تدریجی ارائه می‌دهند و مبنای تحلیل رفتار استراحت تنش در مقیاس‌های زمانی مختلف محسوب می‌شوند. مقایسه‌ی این داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری و نیز با افزایش تعداد مراحل بارگذاری، دامنه تغییرات تنش گسترده‌تر می‌شود. به بیان دیگر، در نرخ‌های پایین، آزادسازی تنش با آهنگ ملایم و تدریجی صورت می‌گیرد، در حالی که در نرخ‌های بالاتر، آزادسازی سریع‌تر و در مراحل اولیه بارگذاری شدیدتر است. این روند به وضوح بیانگر ماهیت ویسکوالاستیک لایه‌ی کامپوزیتی و وابستگی زمانی رفتار آن است. در مجموع، تحلیل داده‌ها در سه نرخ ۵۰، ۱۰۰

و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد که افزایش نرخ بارگذاری موجب افزایش سرعت آزادسازی تنش در مراحل اولیه می‌شود و افزایش تعداد مراحل بارگذاری منجر به کاهش تدریجی و تجمعی تنش در مراحل بعدی می‌گردد. در همه‌ی حالت‌ها، پس از مدت معینی، نمودارها به ناحیه‌ی پایدار نزدیک می‌شوند که بیانگر تعادل نسبی تنش در ساختار مرکب است.



شکل ۲ تصویر نمونه در دستگاه آزمایش کشش

جدول ۲ تنش نرمال شده نهایی در انتهای استراحت تنش به‌دست آمده در نرخ‌های پیشروی و مراحل مختلف بارگذاری

مرحله ۴	مرحله ۳	مرحله ۲	مرحله ۱	نرخ پیشروی (mm/min)
-	-	-	۵/۴۱	۵۰ (تک مرحله‌ای)
-	-	۶/۶۵	۶/۳۴	۵۰ (دومرحله‌ای)
-	۸/۸۸	۵/۴۴	۴/۰۸	۵۰ (سه مرحله‌ای)
-	-	-	۴/۶۳	۱۰۰ (تک مرحله‌ای)
-	-	۷/۱۳	۵/۴۴	۱۰۰ (دومرحله‌ای)
-	۷/۴۶	۵/۶۷	۵/۸۳	۱۰۰ (سه مرحله‌ای)
۷/۴۴	۶/۶۵	۶/۰۳	۷/۰۰۴	۱۰۰ (چهار مرحله‌ای)
۹/۳۴	۶/۵۳	۵/۸۶	۶/۳۲	۲۰۰ (چهار مرحله‌ای)

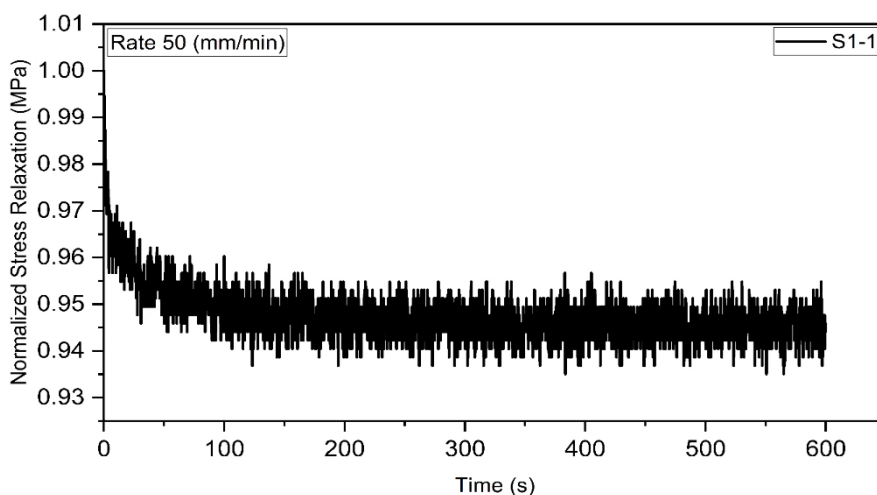
### ۳-۱ رفتار استراحت تنش در نرخ بارگذاری ۵۰ mm/min

رفتار تنش در نرخ ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه دارای ویژگی‌های آرام و تدریجی است. مقادیر کمینه و بیشینه‌ی تنش در جدول ۳ و نمودارهای نرمالایز در شکل‌های ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند. در حالت تک‌مرحله‌ای (S1-1)، تنش با مقدار بیشینه‌ی حدود ۰/۴۴۸ مگاپاسکال آغاز و به تدریج تا مقدار نهایی نرمال شده ۵/۴۱ درصد کاهش یافت. این کاهش در طول زمان آزمون، نشان‌دهنده‌ی آزادسازی آرام تنش‌های پسماند در لایه‌ی رزینی است. مطابق جدول ۳ در حالت دومرحله‌ای (S2-1 و S2-2)، دامنه‌ی تغییرات تنش افزایش یافت و بیشینه به حدود ۳/۵۶۸ مگاپاسکال رسید. مقدار نهایی تنش نرمال شده در این حالت به ترتیب ۶/۳۴ و ۶/۶۵ درصد ثبت شد که بیانگر افزایش در افت تنش نسبت به حالت تک‌مرحله‌ای است. علت این رفتار، بازآرایی مولکولی مجدد ماتریس کامپوزیتی در اثر توقف ۱۰ دقیقه‌ای بین مراحل و توزیع مجدد تنش بین الیاف و چسب است. در حالت سه‌مرحله‌ای (S3-1 تا S3-3)، افت تجمعی تنش با شدت بیشتری ادامه یافت. مطابق شکل ۵ بیشینه‌ی تنش در این حالت ۴/۵۵۲ مگاپاسکال

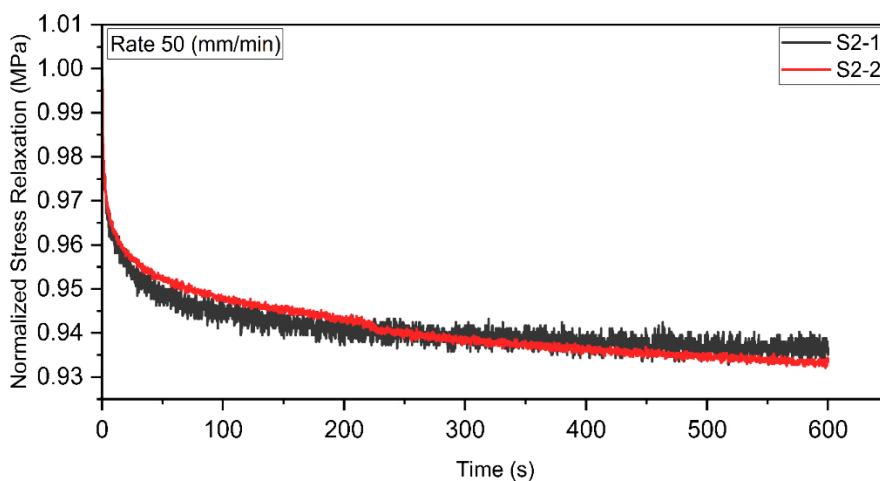
بود و مقدار نهایی نرمال شده تنش به ترتیب ۰.۴/۰.۸، ۵/۴۱ و ۸/۸۸ درصد رسید. این نتایج نشان می‌دهد که پس از مرحله‌ی سوم، ساختار به حالت شبه پایدار نزدیک می‌شود و پدیده‌ی استراحت تنش در حد اشباع خود قرار می‌گیرد. روند تغییرات در نرخ ۵۰ mm/min نشان دهنده آن است که در نرخ‌های پایین، استراحت تنش با آهنگ ملایم آغاز شده و به تدریج در مراحل بعدی تقویت می‌شود. این رفتار نشانگر کنترل مؤثر مکانیزم‌های درونی جذب تنش در لایه‌ی پلیمری و حفظ چسبندگی بین لایه‌های در طی فرآیند بارگذاری است.

جدول ۳ مقادیر بیشینه و کمینه تنش و نیرو برای حالت‌های مختلف بارگذاری در نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه

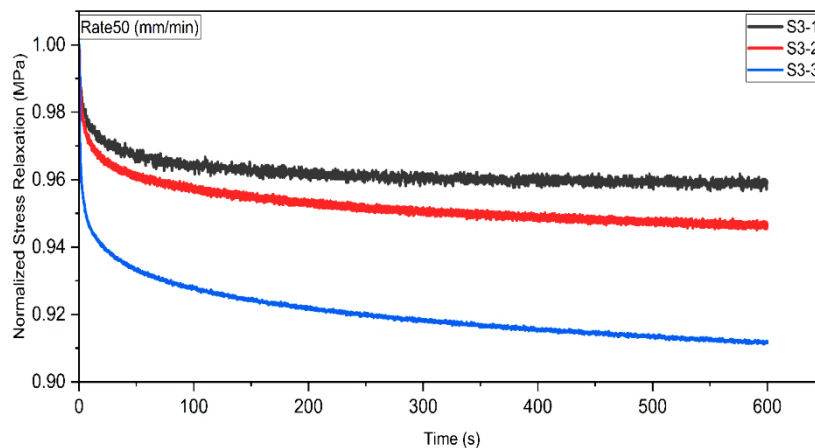
نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	کد مراحل	بیشترین تنش (مگاپاسکال)	کمترین تنش (مگاپاسکال)	بیشترین نیرو (نیوتن)	کمترین نیرو (نیوتن)
۵۰	S1-1	۰/۴۴۸۴۸۷	۰/۰۵۸۲۹۴	۳۳۹۶/۷	۴۴۱/۵
۵۰	S2-1	۱/۰۸۳۹۷۸	۰/۰۰۰۸۰۵	۸۲۰۹/۷	۶/۱
۵۰	S2-2	۳/۵۶۸۴۹	۱/۷۸۴۲۴۵	۲۷۰۲۶/۶	۱۳۵۱۳/۳
۵۰	S3-1	۱/۶۰۶۹۵	۰/۰۰۷۲۹	۱۲۱۷۰/۵	۶/۱
۵۰	S3-2	۳/۲۳۰۰۹۴	۱/۵۴۲۱۸۳	۲۴۴۶۳/۷	۱۱۶۸۰
۵۰	S3-3	۴/۵۵۲۰۸	۳/۰۵۱۱۸۵	۳۴۴۷۶	۲۳۱۰۸/۷



شکل ۳ نمودار استراحت تنش بر حسب زمان با نرخ ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در یک مرحله‌ی زمانی



شکل ۴ نمودار استراحت تنش بر حسب زمان با نرخ ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در دو مرحله‌ی زمانی



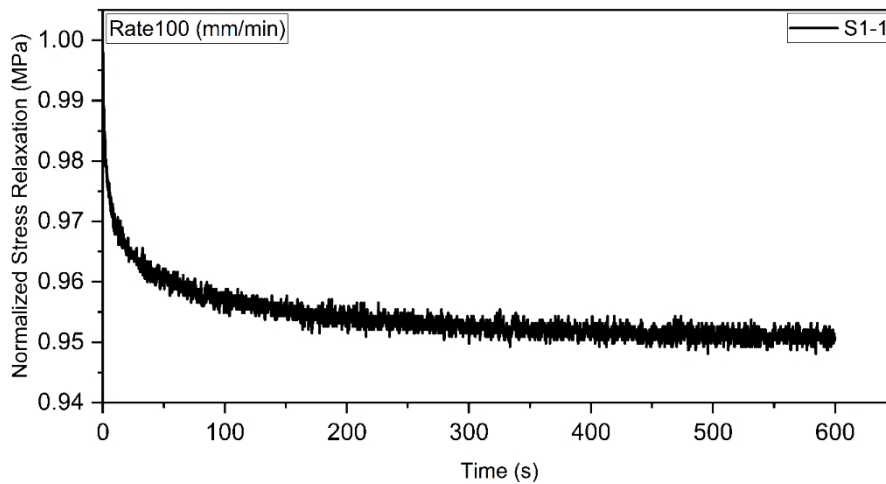
شکل ۵ نمودار استراحت تنش بر حسب زمان با نرخ ۵۰ میلی متر بر دقیقه در سه مرحله ی زمانی

### ۲-۳ رفتار استراحت تنش در نرخ بارگذاری ۱۰۰ mm/min

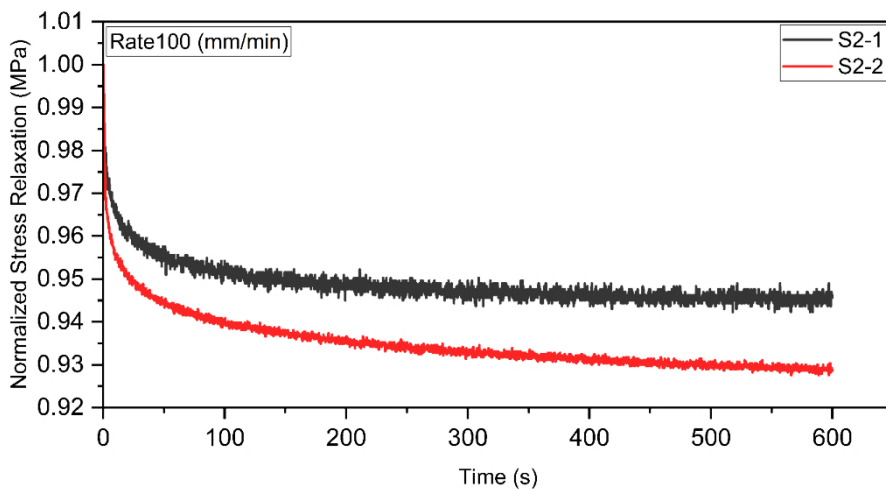
رفتار کلی در نرخ متوسط ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه بیانگر آن است که سیستم پس از هر مرحله بارگذاری تمایل بیشتری به تثبیت تنش دارد و مکانیزم‌های آزادسازی به‌صورت یکنواخت‌تری عمل می‌کنند. این ویژگی در سازه‌های مرکب، مطلوب محسوب می‌شود زیرا نشانگر پایداری تنش در بارگذاری‌های متناوب است. در این نرخ رفتار سیستم متعادل‌تر و هموارتر از حالت قبلی است. داده‌های جدول ۴ و نمودارهای شکل‌های ۶ تا ۹ این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهند. در حالت تک‌مرحله‌ای (S1-1)، مقدار بیشینه تنش ۱/۴۳۵ مگاپاسکال و مقدار نهایی نرمال شده ۰/۴۹۶۳ درصد گزارش شد که کمی بیشتر از مقدار متناظر در نرخ ۵۰ است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری، در فاز اولیه انرژی کشسان بیشتری در ساختار ذخیره می‌شود، اما فرآیند استراحت تنش سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در حالت دوم‌مرحله‌ای (S2-1 و S2-2)، بیشینه‌ی تنش به ۲/۳۱۳ مگاپاسکال افزایش یافت و مقدار نهایی نرمال شده به ترتیب ۵/۴۳ و ۷/۱۳ درصد ثبت شد. نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهند که در مرحله‌ی دوم افت تنش با شیب ملایم‌تری ادامه یافته و سپس به حالت پایدار رسیده است. در حالت سه‌مرحله‌ای (S3-1 تا S3-3)، رفتار استراحت تنش یکنواخت‌تر و پایدارتر شد و مقادیر نهایی ۵/۸۳، ۵/۶۷ و ۷/۴۶ درصد به‌دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی نزدیک‌شدن سیستم به حالت پایدارتر نسبت به نرخ ۵۰ هستند. مطابق شکل ۹، در حالت چهار مرحله‌ای (S4-1 تا S4-4)، مقدار نهایی تنش نرمال شده در چهار مرحله به ترتیب ۷/۰۰۴، ۶/۰۳، ۶/۶۵ و ۷/۴۴ درصد رسید. مشاهده می‌شود که کاهش تنش در مراحل دوم تا چهارم تدریجی‌تر و با دامنه‌ی کمتر است، که بیانگر نوعی تعادل داخلی در ساختار است.

جدول ۴ مقادیر بیشینه و کمینه تنش و نیرو برای حالت‌های مختلف بارگذاری در نرخ پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

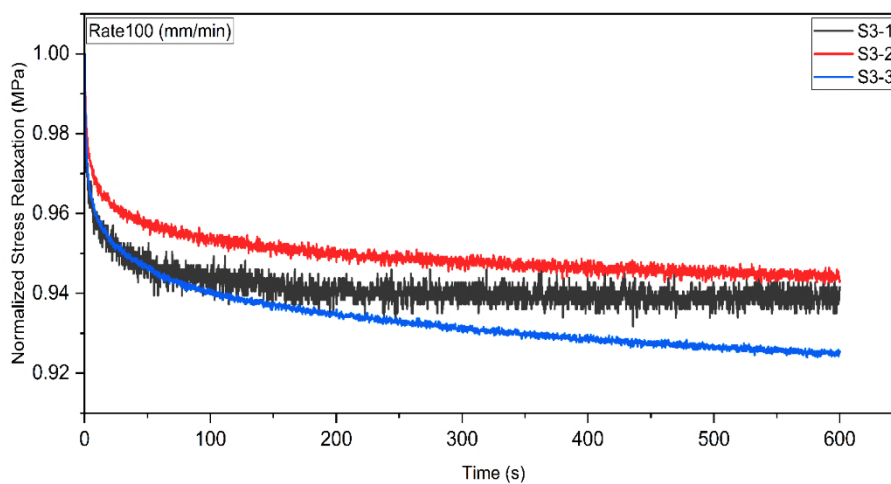
نرخ پیشروی (mm/min)	کد مراحل	بیشترین تنش (MPa)	کمترین تنش (MPa)	بیشترین نیرو (N)	کمترین نیرو (N)
۱۰۰	S1-1	۱/۴۳۵۳۲۶	۰/۰۰۳۲۳۵	۱۰۸۷۰/۷	۲۴/۵
۱۰۰	S2-1	۱/۲۲۱۶۱۲	۰/۰۰۲۴۲۹	۹۵۵۲/۱	۱۸/۴
۱۰۰	S2-2	۲/۳۱۳۶۸۴	۱/۱۵۴۴۱۹	۱۷۵۲۳/۱	۸۷۴۳/۲
۱۰۰	S3-1	۰/۷۳۵۰۷	۰/۰۰۰۸۱	۵۵۶۷/۲	۶/۱
۱۰۰	S3-2	۱/۷۸۴۲۴	۰/۶۸۹۷۳	۱۳۵۱۳/۳	۵۲۲۳/۸
۱۰۰	S3-3	۲/۹۷۱۰۳۹	۱/۶۸۲۲۳۴	۲۲۵۰۱/۷	۱۲۷۴۰/۷
۱۰۰	S4-1	۰/۲۸۹۰۱۴	۰/۰۰۳۲۳۵	۲۱۸۸/۹	۲۴/۵
۱۰۰	S4-2	۰/۹۷۸۷۴۵	۰/۲۶۹۵۷۸	۷۴۱۲/۷	۲۰۴۱/۷
۱۰۰	S4-3	۱/۸۳۶۰۵۶	۰/۹۷۵۵۹۲	۱۳۹۰۵/۷	۶۹۳۴/۴
۱۰۰	S4-4	۲/۵۴۱۱۶۹	۱/۷۱۰۵۶۹	۱۹۲۴۶	۱۲۹۵۵/۳



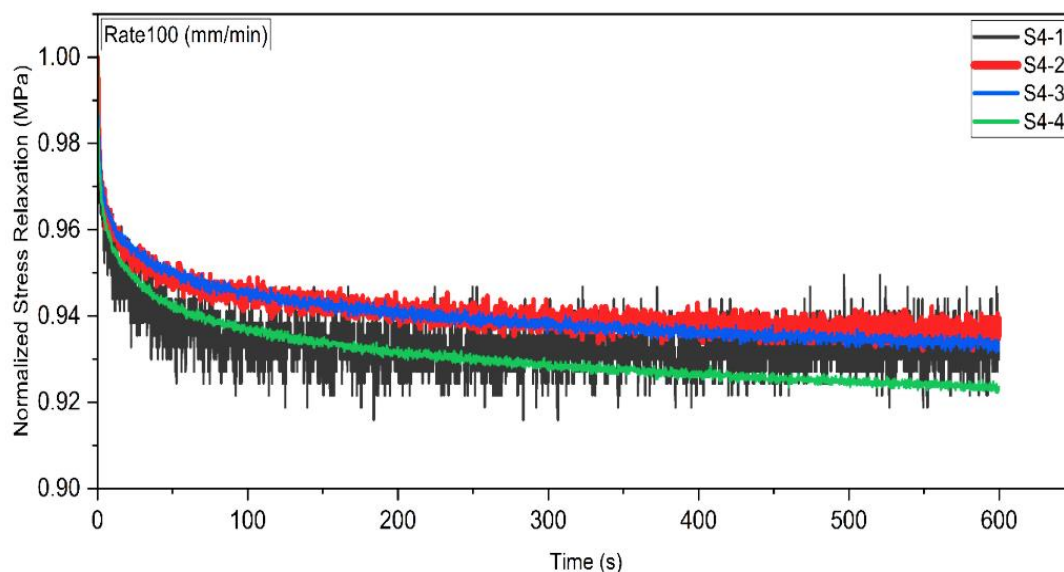
شکل ۶ نمودار استراحت تنش بر حسب زمان با نرخ ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در یک مرحله‌ی زمانی



شکل ۷ نمودار استراحت تنش بر حسب زمان با نرخ ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در دو مرحله‌ی زمانی



شکل ۸ نمودار استراحت تنش بر حسب زمان با نرخ ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در سه مرحله‌ی زمانی



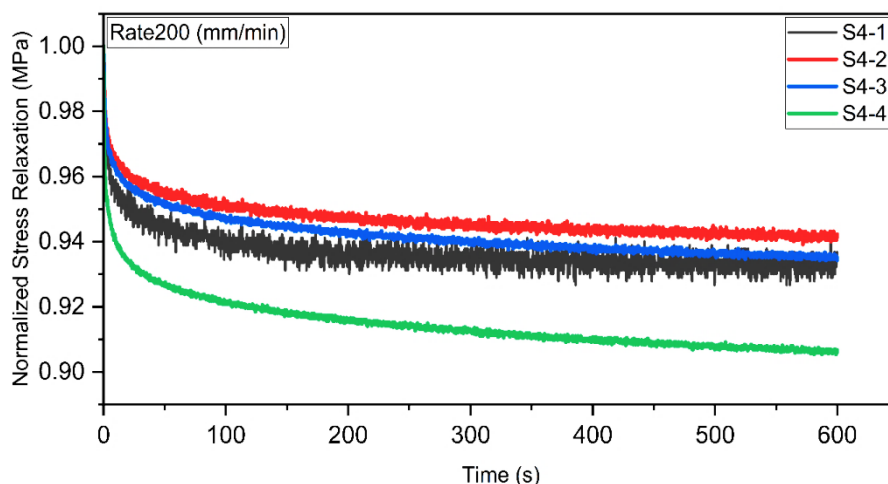
شکل ۹ نمودار استراحت تنش برحسب زمان با نرخ ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در چهار مرحله‌ی زمانی

### ۳-۳ رفتار استراحت تنش در نرخ بارگذاری ۲۰۰ mm/min

در نرخ بالای ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، آزادسازی و باز توزیع تنش با شدت بیشتری رخ داد. جدول ۵ نشان می‌دهد که در مرحله اول (S4-1)، مقدار کمینه‌ی تنش تنها ۰/۰۰۱۶۲ مگاپاسکال و بیشینه‌ی آن ۰/۷۲۹۴۱ مگاپاسکال بود، که بیانگر آزادسازی بسیار سریع در ثانیه‌های ابتدایی بارگذاری است. در مراحل دوم و سوم، دامنه‌ی تنش افزایش یافت و بیشینه‌ها به ترتیب ۱/۸۲۲۲۸۵ و ۲/۷۱۱۹۸۴ مگاپاسکال رسیدند. نهایتاً، در مرحله چهارم (S4-4)، بیشترین مقدار تنش ۳/۴۶۵۶۷ مگاپاسکال ثبت شد که درعین حال مقدار نهایی نرمال شده به ۹/۳۴ درصد کاهش یافت. مطابق شکل ۱۰ این مقدار کمترین تنش پایدار در میان تمامی مراحل بود. رفتار مشاهده‌شده در این نرخ را می‌توان به فعال شدن سریع‌تر مکانیزم‌های لغزش بین‌لایه‌ای، افزایش کرنش‌های موضعی، و تسریع فرآیند بازآرایی زنجیره‌های پلیمری نسبت داد. در واقع، در نرخ‌های بالا فرصت کافی برای تطبیق ویسکوالاستیک فراهم نیست و در نتیجه، آزادسازی تنش به صورت ناگهانی‌تر رخ می‌دهد. همچنین دیده می‌شود که با افزایش تعداد مراحل، ساختار کامپوزیتی تمایل بیشتری به نرم‌شوندگی دارد و در پایان مرحله چهارم، منحنی‌ها به حالت پایدار نزدیک می‌شوند. این روند بیانگر نوعی رفتار خستگی گونه‌ی وابسته به نرخ بارگذاری است که در سازه‌های دریایی یا تحت بارهای متناوب محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد.

جدول ۵ مقادیر بیشینه و کمینه تنش و نیرو برای حالت‌های مختلف بارگذاری در نرخ پیشروی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	کد مراحل	بیشترین تنش (مگاپاسکال)	کمترین تنش (مگاپاسکال)	بیشترین نیرو (نیوتن)	کمترین نیرو (نیوتن)
۲۰۰	S4-1	۰/۷۲۹۴۱	۰/۰۰۱۶۲	۵۵۲۴/۳	۱۲/۳
۲۰۰	S4-2	۱/۸۲۲۲۸۵	۰/۶۷۸۴۰۲	۱۳۸۰۱/۴	۵۱۳۸
۲۰۰	S4-3	۲/۷۱۱۹۸۴	۱/۷۱۰۵۶۹	۲۰۵۳۹/۷	۱۲۹۵۵/۳
۲۰۰	S4-4	۳/۴۶۵۶۷	۲/۵۳۳۸۸	۲۶۲۴۷/۹	۱۹۱۹۰/۸



شکل ۱۰ نمودار استراحت تنش برحسب زمان با نرخ ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در چهار مرحله‌ی زمانی

#### ۴- نتیجه‌گیری و بحث

رفتار استراحت تنش در سیستم‌های ترکیبی فولاد-کامپوزیت تقویت‌شده با GFRP نشان داد که پاسخ سازه به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های ویسکوالاستیک رزین اپوکسی، تاریخچه بارگذاری و تعداد مراحل اعمال بار قرار دارد. نتایج آزمایش‌ها به‌وضوح بیانگر آن است که کاهش تنش در دقیقه‌های ابتدایی هر مرحله بسیار شدیدتر است و پس از آن، سیستم به تدریج به یک حالت شبه پایدار نزدیک می‌شود؛ رفتاری که به مکانیسم بازآرایی تدریجی ساختار مولکولی ماتریس پلیمری نسبت داده می‌شود. افزایش نرخ بارگذاری موجب افزایش تنش اولیه و در نتیجه تشدید افت تنش در مرحله نگهداری شد، زیرا اپوکسی در نرخ‌های بالاتر فرصت کافی برای آزادسازی انرژی ذخیره‌شده ندارد. برعکس، در نرخ‌های بارگذاری پایین، تنش اولیه کمتر و روند استراحت آهسته‌تر اما ماندگارتر بود که نشان‌دهنده غلبه رفتار ویسکوالاستیک بلندمدت بر پاسخ الاستیک فوری است.

افزایش تعداد مراحل بارگذاری نیز نقش مهمی در تشدید استراحت تنش داشت. نمونه‌های سه‌مرحله‌ای و چهارمرحله‌ای حدود ۴ تا ۷ درصد افت تنش بیشتری نسبت به حالت تک‌مرحله‌ای تجربه کردند. این موضوع نشان می‌دهد که توقف‌های میان مرحله‌ای، شرایطی مناسب برای آزادسازی انرژی پسماند در لایه چسب و توزیع مجدد تنش فراهم کرده و باعث نزدیک شدن تدریجی سیستم به یک حالت تعادل ساختاری می‌شود. در واقع، هر دوره توقف، موجب آرام‌سازی بیشتری در ماتریس رزینی و تغییر مسیر انتقال تنش بین لایه‌ها می‌گردد.

از منظر مکانیکی، این تغییرات تنها به کاهش تنش محدود نمی‌شوند، بلکه به‌طور مستقیم بر مکانیزم آغاز و گسترش شکست نیز تأثیرگذارند. مشاهده شکست در ناحیه فصل مشترک فولاد-کامپوزیت نشان می‌دهد که رفتار زمان‌وابسته چسب عامل اصلی تمرکز تنش و تعیین‌کننده ظرفیت نهایی سیستم است. این موضوع در کاربردهای واقعی خطوط لوله، که بارگذاری‌ها غالباً ماهیت متناوب، تدریجی یا چندمرحله‌ای دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، استراحت تنش می‌تواند موجب جابجایی ناحیه بحرانی، تغییر مکانیزم‌های گسیختگی و تغییر الگوی انتقال تنش در طول زمان شود؛ مسائلی که در صورت نادیده‌گرفتن، موجب خطای قابل توجه در پیش‌بینی عمر و پایداری سازه خواهد شد.

این یافته‌ها ضرورت در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک اپوکسی و بارگذاری مرحله‌ای را در مدل‌سازی‌های عددی، شبیه‌سازی‌های وابسته به زمان و طراحی واقعی سیستم‌های تقویت‌شده نشان می‌دهد، به‌ویژه در پروژه‌های دریایی و زیرآبی که سازه‌ها در معرض تغییرات بار در بازه‌های زمانی مختلف هستند. بنابراین داده‌های این پژوهش می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای کالیبراسیون مدل‌های پیچیده‌تر و توسعه روش‌های تقویت با دوام بالاتر مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

- بیشترین میزان افت تنش در دقیقه‌های ابتدایی هر مرحله رخ داد و سیستم به تدریج به حالت شبه پایدار نزدیک شد.
- افزایش نرخ بارگذاری باعث افزایش تنش اولیه و استراحت سریع‌تر تنش شد.
- در نرخ‌های پایین بارگذاری افت تنش آهسته‌تر اما ماندگارتر بود که نشان‌دهنده غلبه رفتار ویسکوالاستیک است.
- افزایش مراحل بارگذاری موجب افزایش ۴ تا ۷ درصدی افت تنش کلی نسبت به حالت تک‌مرحله‌ای گردید.
- چرخه‌های توقف میان مراحل فرصت بازآرایی ساختار رزین و بازتوزیع تنش در چسب و لایه‌های میانی را فراهم کردند.
- شکست در فصل مشترک فولاد-کامپوزیت رخ داد که اهمیت نقش چسب در تمرکز تنش و رفتار زمان‌وابسته را نشان می‌دهد.
- رفتار استراحت تنش می‌تواند مکانیزم‌های شکست را تغییر داده و ناحیه تمرکز تنش را جابه‌جا کند.
- در طراحی و مدل‌سازی سازه‌ها باید ویسکوالاستیسیته و بارگذاری مرحله‌ای به‌طور صریح لحاظ شود، به‌ویژه در خطوط لوله و کاربردهای دریایی.

### Authorship Contribution Statement

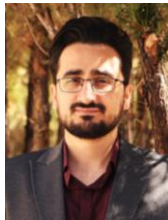
**Ramin Beyranvand**



**Biography:** MSc. Student at Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

**Contribution Statement:** Methodology, Validation, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review.

**Dr. Mehdi Ansari**



**Biography:** Assistant Professor at Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

### ۵- مراجع

- [1] Shamsuddoha M, Islam MM, Aravinthan T, Manalo A, Lau K-t. Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs. *Composite Structures*. 2013;100:40–54.
- [2] Alabtah FG, Mahdi E, Eliyan FF. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. *Composite Structures*. 2021;276:114595.
- [3] Reddy MI, Madhavarao S, BhadriRaju CR, Kumar MA, Varma PR. The effect of carbon fiber powder reinforced composite coating on mechanical properties of TIG welded black steel pipes. *Materials Today: Proceedings*. 2022;62:3516–21.
- [4] Kong D, Huang X, Xin M, Xian G. Effects of defect dimensions and putty properties on the burst performances of steel pipes wrapped with CFRP composites. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020;186:104139.

- [5] Shi J, Wang W, Wei W, Jia B. Calculation model for bearing capacity of steel-CFRP composite pipeline under internal pressure. *Heliyon*. 2024;10.
- [6] Arifin HH, Zardasti L, Lim KS, Noor NM, Yahaya N, Mazlan AN, et al. Stress distribution analysis of composite repair with Carbon Nanotubes reinforced putty for damaged steel pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021;194:104537.
- [7] Gazor MS, Ansari M, Hedayati Sk, Ansari M. Bone fixation implants with in-situ controllable stiffness: Modifying the R-curve behavior by 3D printing. *Journal of Composite Materials*. 2022;56:2337–50.
- [8] Kabiri A, Liaghat G, Alavi F, Ansari M, Hedayati SK. A comparative study of 3D printing and heat-compressing methods for manufacturing the thermoplastic composite bone fixation plate: Design, characterization, and in vitro biomechanical experimentation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2021;235:1439–52.
- [9] Ansari M, Golzar M, Baghani M, Taghavimehr M, Shirsavar MA, Yahyavi M. An experimental investigation on shape memory polymer and metallic stents under bending and radial compression. *Engineering Research Express*. 2020;2:045012.
- [10] Ansari M, Golzar M, Behravesh AH. Evaluation of corrugated composite beam deflection by shape memory alloy wire. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14.
- [11] Kong D, Zhou P, Li C, Hong B, Xian G. Stress intensity factor of through-wall-cracked steel pipe wrapped with prestressed CFRP composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023;283:109218.
- [12] Abd-Elhady AA, Sallam HE-DM, Alarifi IM, Malik RA, El-Bagory TM. Investigation of fatigue crack propagation in steel pipeline repaired by glass fiber reinforced polymer. *Composite Structures*. 2020;242:112189.
- [13] Li Z, Jiang X, Hopman H, Zhu L, Liu Z. External surface cracked offshore steel pipes reinforced with composite repair system subjected to cyclic bending: An experimental investigation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020;109:102703.
- [14] Chen J, Wang H, Salemi M, Balaguru PN. Finite element analysis of composite repair for damaged steel pipeline. *Coatings*. 2021;11:301.
- [15] Junior MW, Reis J, da Costa Mattos H. Polymer-based composite repair system for severely corroded circumferential welds in steel pipes. *Engineering Failure Analysis*. 2017;81:135–44.
- [16] Ahankari S, Patil A. Sea water effect on mechanical performance of steel pipes rehabilitated with glass fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*. 2020;22:2490–8.
- [17] George JM, Kimiaei M, Elchalakani M, Fawzia S. Experimental and numerical investigation of underwater composite repair with fibre reinforced polymers in corroded tubular offshore structural members under concentric and eccentric axial loads. *Engineering Structures*. 2021;227:111402.
- [18] Verde R, D'Amore A, Grassia L. A Numerical Model to Predict the Relaxation Phenomena in Thermoset Polymers and Their Effects on Residual Stress during Curing—Part I: A Theoretical Formulation and Numerical Evaluation of Relaxation Phenomena. *Polymers*. 2024;16:1433.
- [19] Lim KS, Azraai SNA, Yahaya N, Noor NM, Zardasti L, Kim J-HJ. Behaviour of steel pipelines with composite repairs analysed using experimental and numerical approaches. *Thin-Walled Structures*. 2019;139:321–33.
- [20] Hassan A, Sokairge H, Elshafie H. Relaxation behavior of basalt fiber reinforced polymer bars under different environmental conditions. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2025;29:32.

- [21] Mehmanparast A. Evaluation of Frequency Effects on Corrosion-Fatigue Behaviour of Offshore Steel Pipelines. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: American Society of Mechanical Engineers; 2024. p. V003T03A7.
- [22] Stochioiu C, Hadär A, Piezel B. Mechanical response of epoxy resin—flax fiber composites subjected to repeated loading and creep recovery tests. *Polymers*. 2023;15:766.