



## Stress induction in steel parts using alternating magnetic field

Sirwan Farhadi <sup>a\*</sup>, Mohammad Aslani <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering University of Kurdistan, Sanandaj, 66177-15175, Iran

### Original Article

Use your device to scan  
and read the article online



**Citation:** Farhadi S, Aslani M. Stress induction in steel parts using alternating magnetic field. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(3):363-379.

 <https://10.61186/masm.3.3.363>

### KEYWORDS

Stress induction,  
Alternating magnetic field,  
Natural frequency.

### ABSTRACT

In this research, the induction of high-frequency alternating stresses in steel parts using an alternating magnetic field has been investigated experimentally. This treatment, in addition to the induction of alternating stresses, can increase the temperature of the part and facilitate the release of residual stresses. Residual stresses caused by the welding process in the area around the weld line are a good example of the applications of this method. This method is very fast, and it can be used for small or large parts without space limitations. Also, the necessary equipment can be prepared easily at low costs. This study uses a small coil with an iron core to induce the magnetic field, and a simple and cheap electric board to create an oscillating current in the coil. The electric board employs a high-frequency electronic switch in a DC circuit to generate a rectangular waveform voltage. The obtained experimental results show that the steel part can resonate at frequencies close to the first longitudinal natural frequency or its subharmonics, and in this case, normal stresses in the order of 100 MPa are induced in the part. By upgrading the electrical equipment prepared in this research, it is possible to increase the induced stresses several times. Hence, employing appropriate equipment, the high-frequency magnetic induction method can be used as an alternative method for stress relief of welded joints.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

The induction of dynamic stresses in mechanical parts can release residual stresses. Different dynamic methods can be classified into three general categories: impulse methods, large-amplitude and low-frequency methods (relative to the natural frequency of the part), and small-amplitude and high-frequency methods. In the third method, small periodic forces of a frequency close to the part's natural frequency are applied to it, and by creating resonance, they induce large stresses into the part. Induced stresses can accumulate with residual stresses and release residual stresses by causing local plastic deformations.

The method of magnetic stress relief is a relatively new technique. In the late 1980s, reports were published that showed a significant increase in the lifespan of mechanical parts that underwent pulsed magnetic treatment. Initial observations revealed that this process causes changes in residual stress, density of dislocations, and discontinuities [1-6]. Since then, numerous studies have been conducted on stress relief through alternating magnetic induction on different materials, most of which were experimental and in the form of pulse or low frequency. For example, references [7-23] can be cited. All the experimental tests conducted by researchers indicate that the magnetic method has a high potential and can be a viable alternative to other stress relief methods.

\* Corresponding author. Tel.: +989125187960

E-mail address: [s.farhadi@uok.ac.ir](mailto:s.farhadi@uok.ac.ir)

DOI: <https://10.61186/masm.3.3.363>

Received: October 04, 2023; Received in revised form: November 09, 2023; Accepted: December 19, 2023.

© Author



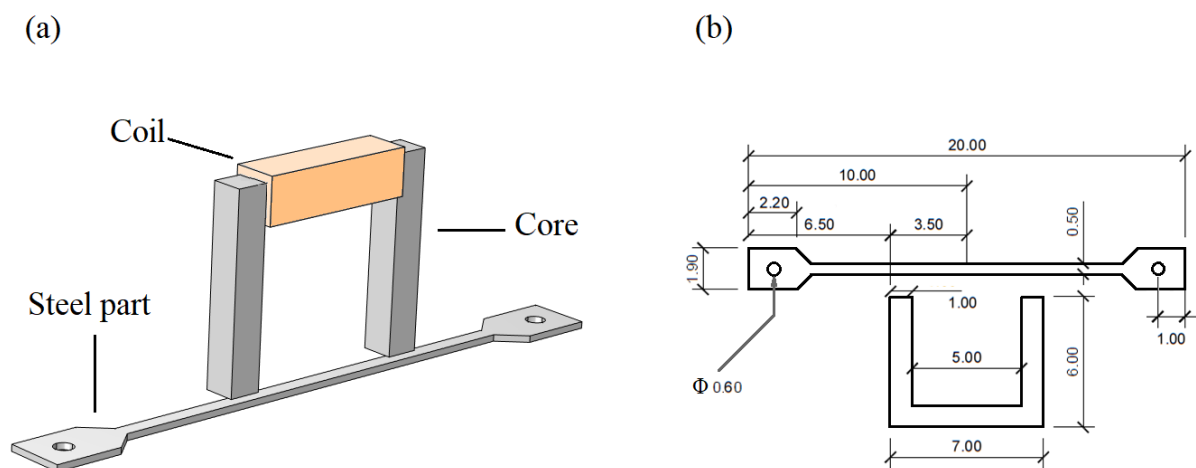
Based on both experimental results and simulations [8,24], it has been found that the maximum residual stress caused by welding is longitudinal and perpendicular to the welding line. This residual stress typically measures approximately half of the yield stress of the part. Therefore, to effectively release these residual stresses at room temperature, induced stresses must be greater than half of the yield stress. The study mentioned in reference [24] demonstrated that by using a small coil with an iron core and a current of 1 ampere, it is possible to induce stresses of several tens of MPa in small steel parts. The present study aims to qualitatively evaluate the results of reference [24] by combining finite element simulations and experimental tests to assess the possibility of inducing large mechanical stresses with a small magnetic field of high frequency.

In this research, an alternating magnetic field is used to create high-frequency dynamic stresses in steel components. This magnetic field increases the temperature of the components and helps to release residual stresses more effectively, especially in the weld line area. This method is advantageous because it is fast and can be applied to components of any size without space limitations. Additionally, the equipment needed for this method is easy to prepare and relatively inexpensive. High-frequency magnetic stress relief has not been studied in the range of natural frequencies until now, making these results novel with no similar cases published.

## 2. Equipment and test method

In this study, we aim to apply extensive longitudinal stresses in a steel piece by exciting it at a frequency close to its first longitudinal natural frequency. A tensile testing device with a fixed and movable jaw is employed to measure the induced stresses. The movable jaw is adjusted using a power screw to subject the test specimen to a constant pretension. The fixed jaw of the machine is attached to a Lascaux-STC500kg load cell utilized to measure the tensile force induced in the test part during the experiment. Two holes were drilled on either end of the specimen, to secure it in the machine's jaws with two screws. The load cell's output port is connected to a BSWA-MC3022 audio card, which ensures highly precise measurements. However, the pre-tension effect and plastic deformation cannot be directly measured since the sound card filters out the output DC signal.

A coil with a U-shaped layered iron core induces dynamic stresses in the target part. A high-frequency MOSFET switches the DC power supply on and off periodically, generating an alternating current in the coil. Figure 1a displays a view of the tension specimen and the positioning of the iron core next to it. Figure 1b provides the dimensions of the test specimen and the iron core in millimeters. The steel component has a thickness of 2 mm, and the iron core has a thickness of 10 mm. The test specimen is made of St37 construction steel.



**Figure 1. a) The configuration of the cored coil and the steel piece under the treatment b) Dimensions of the steel piece and the coil core in centimeters**

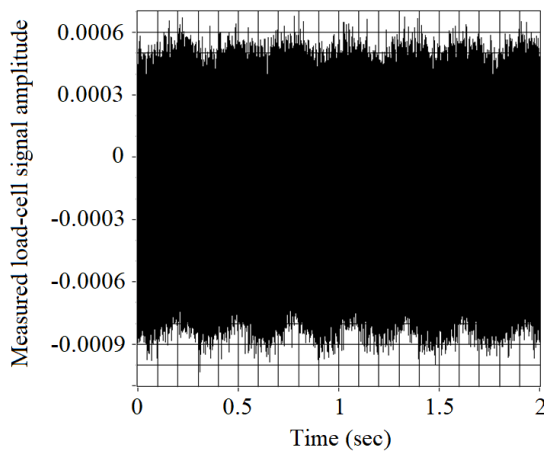
The iron core is placed in contact with the steel part at its center. The DC component of the electric current causes the iron core to stick to the steel part. When an electric current is induced in the coil, it creates symmetrical forces that apply to both sides of the specimen's center part, causing it to be put under tension. By switching the coil current on and off alternately, these forces stimulate the steel specimen with a frequency that could be one or two times the switching frequency, depending on the material of the core and part.

To limit the coil current to a suitable range for the electrical board and, at the same time, to provide enough current (about 1 ampere) for sufficient stress induction, a coil with 100 turns of lacquered wire of 0.45 mm diameter is used in series with an electrical resistance of 5 ohms. A constant voltage of 15 volts powers the electric circuit. It is worth mentioning that as the excitation frequency increases, the impedance of the coil increases, causing the passing current to decrease as well.

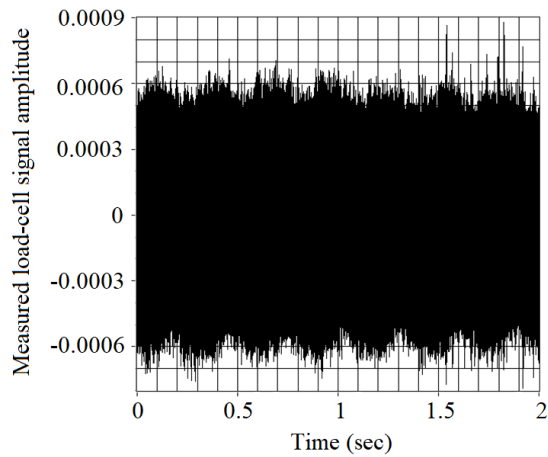
### 3. Experimental and simulation results

After fixing the tensile sample in the tensile testing machine, the coil core was placed in contact with it, and alternating voltages of specific frequencies were applied to the coil. Each experiment lasted for 5 seconds and was carried out once the steel part had cooled to room temperature. The frequencies applied started from 1.5 kHz and increased in 100 Hz steps up to 22 kHz. The obtained results showed that in the frequency range of 1.5 to 10 kHz, the amplitude of the output signal measured by the audio card remained in an almost identical range, and then decreased dramatically beyond that range.

(a)  $f = 2000$  (Hz)



(b)  $f = 10000$  (Hz)



(c)  $f = 20000$  (Hz)

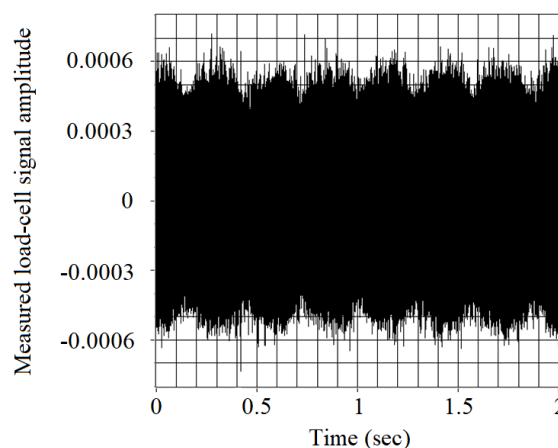


Figure 2. The load cell output signal measured by the sound card in response to different excitation frequencies

When using a square excitation voltage, the force signal measured by the load cell will contain the odd harmonics of the excitation frequency if the induced electric current is the same. However, in practice, the induced current in the coil is not a square signal due to the coil impedance and the vibrations of the steel piece and coil

core. The experimental results demonstrate that the output signal of the load cell contains both the odd and even superharmonics of the excitation frequency. The existence of these harmonics shows a possibility of resonance in odd and even subharmonics of excitation frequency. This issue can answer why the amplitude of the response signal in almost the entire range below half the natural frequency is in the same order as the response signal of the steel piece near the natural frequency. As an instance, Figure 3 shows the power spectrum of the data logger output signal for the excitation frequency of 6 kHz.

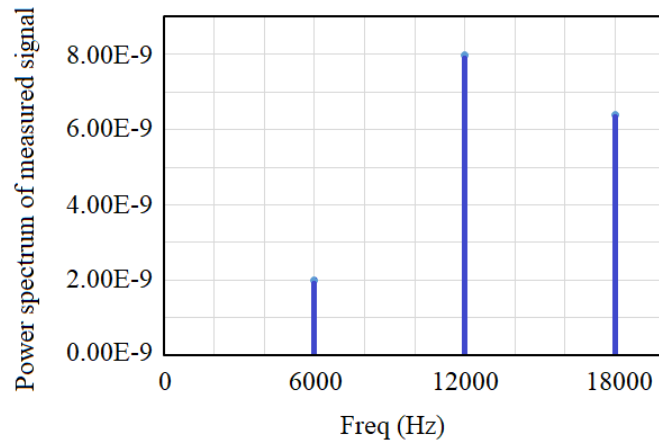


Figure 3. Power spectrum of the measured signal at the excitation frequency of 6 kHz

To examine how excitation frequency affects the load-cell response signal, Figure 4a displays changes in signal power spectrum amplitude at the fundamental frequency (1x frequency component). The graph shows that as the excitation frequency increases, the amplitude of the signal power in the first harmonic gradually increases until it reaches its peak at a frequency of 20.1 kHz, which is close to the first longitudinal natural frequency of the steel part. After this, the amplitude decreases rapidly. Figure 4b shows the induced current in the coil at a constant voltage of 15 volts. As seen in the figure, the increase in the electrical impedance of the circuit has caused a significant reduction in the induced current.

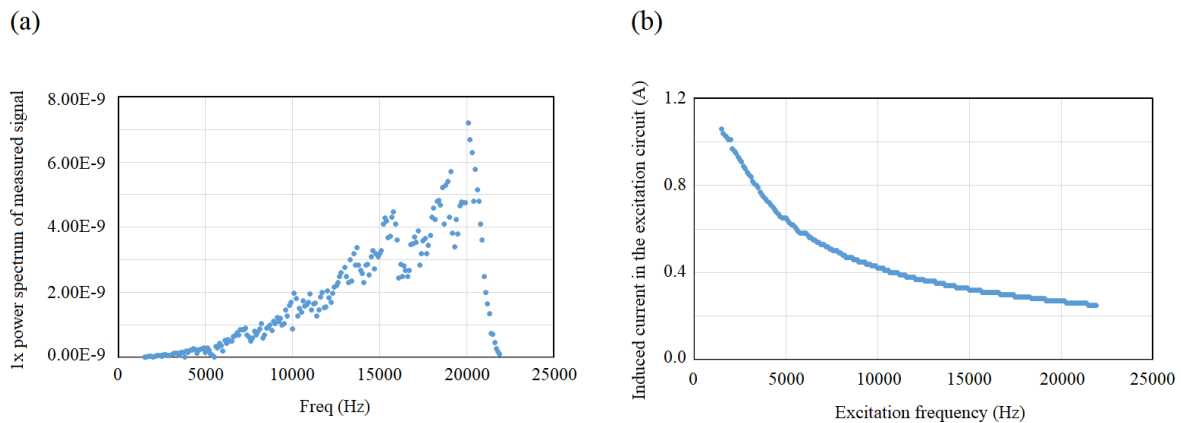


Figure 4. a) Power spectrum amplitude of the measured signal in the 1x harmony, b) Induced current in the coil circuit with a constant supply voltage of 15 volts and different excitation frequencies

To estimate the stress induced in the part, we need to establish the relationship between the output voltage of the load cell and the amplitude of the power spectrum. It's important to note there is a data logger between the load cell and the computer, which may alter the measured signal. For this purpose, we connected the data logger to a signal generator and applied different voltages with different frequencies to study the power spectrum values and amplitudes at different excitation frequencies. We conducted several tests and found that there is an almost linear relationship between the power spectrum and the square of the amplitude, as well as between the amplitude of the measured signal and the voltage received by the data logger:

$$Z = K_z \sqrt{PS}, \quad V = K_v Z, \quad (1)$$

where  $Z$  is the signal amplitude,  $PS$  is the power spectrum amplitude,  $V$  is the load cell voltage (data logger input), and  $K_z$  and  $K_v$  are the conversion coefficients. According to the measurements, the conversion coefficients are  $K_z=0.723$  and  $K_v=0.0003625$  (1/mV). According to the manufacturer catalog, the relationship between the force applied to the load cell and the output voltage is also linear:

$$K_p=V/P. \quad (2)$$

Here,  $P$  is the measured force, and  $V$  is the output voltage of the load cell. According to the load cell catalog, at the maximum load of 500 kg, the load cell yields a voltage of 2 mV per one volt of supply voltage. Since the power supply of the load cell in this test is 5 volts, the output voltage at a force of 500 kg is equal to 10 millivolts. Therefore, we will have  $K_p=10/500=0.02$  (mV/kg). Using the obtained conversion coefficients and the final relationship  $P=\sqrt{PS/(K_z*K_v*K_p)}$ , the force applied to the load cell at the excitation frequency of 20.1 kHz is estimated to be 50.79 kg or 497.7 N. As a result, the average stress applied to the support of the part (section adjacent to the hole) is 19.1 MPa.

In stress relief, we try to bring the stress to the plastic limit in the desired area without causing unwanted deformation in other areas. We also prefer to treat the piece freely without the use of any fixture. In the following, we assume that the steel part is operated under free boundary conditions, and we need to estimate the induced stresses in its center point. For this purpose, we use finite element simulations to estimate the force induced by the magnetic field in the previous experimental tests. Then, with the help of the estimated force, we simulate the treatment procedure under the free boundary conditions and estimate the induced stress in the center of the part. With this aim, in the finite element model, we first impose fixed boundary conditions on the steel part at the drilled holes. Then, we apply two opposite point forces to the two sides of the component area located between the two arms of the iron coil, which represent the induced magnetic forces (Fig. 5). To model the misadjustments, we assume that the iron coil is inclined to one of the piece ends by 5 mm. Considering these assumptions, a finite element model of the steel part was prepared in COMSOL. The mass density of the steel part was considered as 7800 kg/m<sup>3</sup>, Young's modulus as 200 GPa, and Poisson's ratio as 0.33. In addition, a damping ratio of 0.001 was used for the first and second longitudinal natural frequencies.

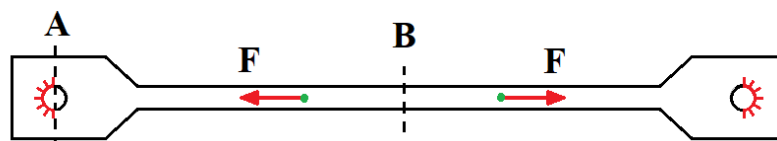
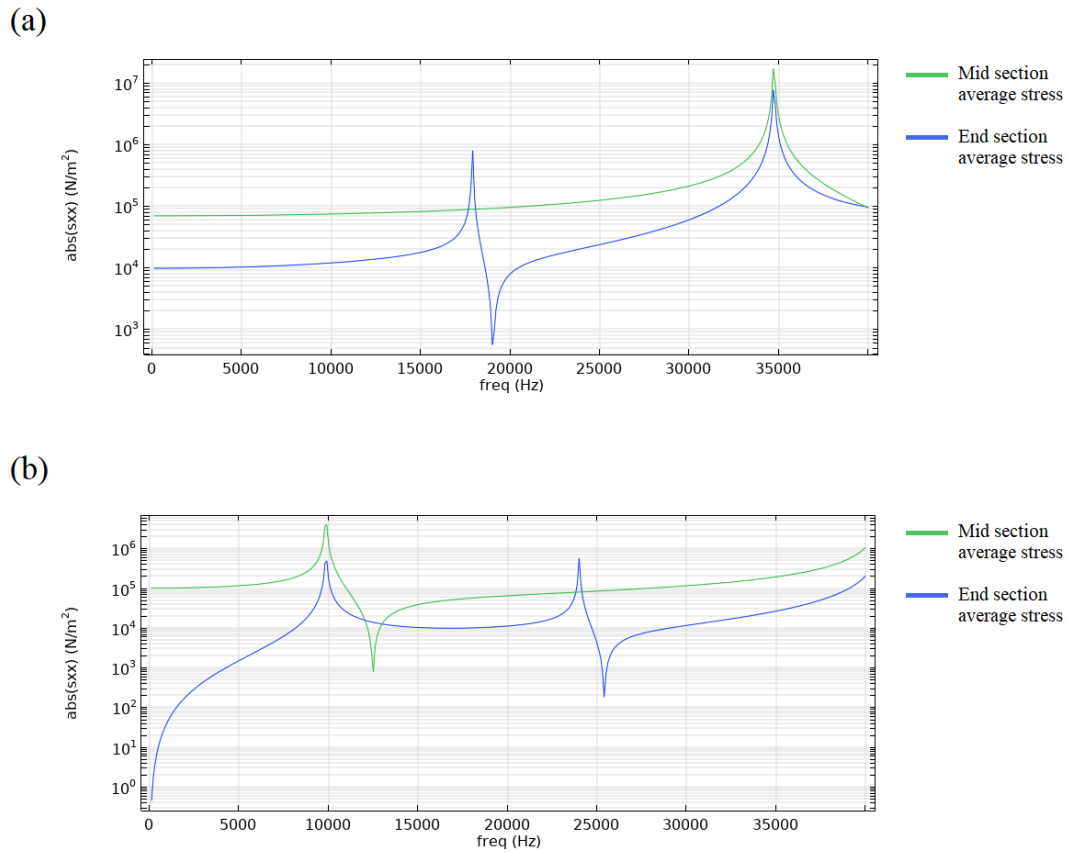


Figure 5. The point forces applied to the piece and the boundary conditions simulated in the FEM model

The steel part was simulated in COMSOL, and by restricting it to in-plane displacements, the harmonic response to the applied forces was investigated at different frequencies. In this simulation, we set the amplitude of the applied force to 1 N and studied the frequency range of 1~22 kHz at a frequency step of 100 Hz. In the first natural frequency (17879 Hz), the maximum displacement occurs in the x direction (longitudinal direction of the piece) in the midpoint of the part, whereas, in the second natural frequency (34700 Hz), the displacement of the part midpoint is equal to zero. According to the simulations, in the first natural frequency, the longitudinal stress in the part midpoint is close to zero, and the maximum longitudinal stresses occur in the two supports. In the second natural frequency, in the part midpoint and the supports, the longitudinal stresses reach local maximums.

Figure 6a shows the frequency response curve of the part in the middle section (section B, Figure 5) and the support section (section A, Figure 5). To measure the stress in the middle section, we select the midpoint of this section, and for the support section, we choose the center of the hole's upper part. At these two points, the longitudinal stress is almost equal to the average stress in the entire section. According to the graph, at the excitation frequency of 17800 Hz, the stress in the support section is 800 kPa, and in the middle section is 88 kPa. At the excitation frequency of 34 kHz, the longitudinal stress in the support section and middle section are 7.6 and 17 MPa, respectively. Therefore, at the excitation frequency close to the second natural frequency, much larger longitudinal stresses can be achieved. However, the equipment prepared for this research limits the study to frequencies lower than 22 kHz. Therefore, we limit our analysis to the first natural frequency. In the experimental part of this study, the stress value of 19.1 MPa was obtained for the support section, which is approximately 23.9 times the value obtained in the finite element simulation (800 kPa) for the excitation force amplitude of 1 N. Thus, using a proportional approximation, the amplitude of the excitation force in the experimental study can be estimated as 23.9 N.



**Figure 6.** The frequency response diagram of the steel part in the middle and support sections corresponding to an excitation force of 1 N amplitude, a) clamped boundary condition, b) free boundary condition

Now consider the piece in free boundary conditions. In this case, the first natural frequency is 9852 Hz. Figure 6b shows the frequency response curve in the middle and support sections. According to the figure, the maximum longitudinal stress is 4 MPa and occurs in the middle section of the part. If we assume that the amplitude of the actual excitation force is 23.9 N, as predicted previously, we can expect a longitudinal stress of 95.6 MPa in the middle section. Obviously, by upgrading the prepared equipment, it is possible to boost the amplitude of the induced stress to several hundreds of MPa, which is high enough to release the residual stresses.

#### 4. conclusion

In this research, the induction of dynamic and high-frequency stresses in a steel piece through alternating magnetic fields was investigated using the experimental and FEM analysis. In the experimental part, the steel piece was subjected to periodic stresses by employing simple and inexpensive electrical equipment and a coil with a U-shaped core. The frequency analysis of the results indicates that the induced current's non-harmonicity may cause the target component to experience mechanical resonance at its natural frequency or subharmonics. Hence, it is possible to apply large stresses to the part at its natural frequency, as well as within a wide range of excitation frequencies below half of the natural frequency. The experiments also demonstrate that the steel piece experiences significant stress, which can be increased by upgrading the equipment, providing sufficient stress for the stress-release process.

Finally, we used FEM analysis and the experimental data to estimate the net force induced by the coil in the part under test. The estimated induced force was then used to simulate the case of free boundary conditions and to estimate the induced stresses under these conditions. Simulation results show that significantly large stresses are induced in the middle section of the part with these assumptions.



## القای تنش در قطعات فولادی با استفاده از میدان مغناطیسی متناوب

سیروان فرهادی الف\*، محمد اصلانی ب

الف استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، [s.farhadi@uok.ac.ir](mailto:s.farhadi@uok.ac.ir)

ب کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، [m.aslani1365@gmail.com](mailto:m.aslani1365@gmail.com)

واژگان کلیدی	چکیده
القای تنش، میدان مغناطیسی متناوب، فرکانس طبیعی.	در این تحقیق القای تنش‌های متناوب فرکانس بالا در قطعات فولادی با استفاده از میدان مغناطیسی متناوب به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. این کار ضمن القای تنش‌های متناوب، می‌تواند باعث افزایش دمای قطعه و تسهیل آزادسازی تنش‌های پسماند گردد. تنش‌های پسماند ناشی از فرایند جوشکاری در ناحیه اطراف خط جوش، مثال خوبی برای کاربردهای این روش هستند. این روش بسیار سریع است و بدون محدودیت مکانی می‌توان آن را برای قطعات کوچک یا بزرگ مورد استفاده قرار داد. همچنین ابزارهای لازم برای این کار را می‌توان به آسانی و با هزینه‌های نسبتاً کمی تهیه نمود. در این مطالعه، برای القای میدان مغناطیسی، از یک سیم‌پیچ کوچک با هسته آهنی استفاده گردید و برای ایجاد جریان نوسانی در سیم‌پیچ، از یک برد الکتریکی ساده و ارزان قیمت استفاده شد که به وسیله یک سوچ الکترونیکی فرکانس بالا که در مسیر یک جریان مستقیم قرار گرفته است، یک موج متناوب مستطیلی را ایجاد می‌نماید. نتایج تجربی به دست آمده نشان می‌دهند که قطعه را می‌توان در فرکانس‌های نزدیک فرکانس طبیعی طولی قطعه و یا زیر هارمونی‌های آن به تشدید رساند و در این حالت تنش‌های طولی در مرتبه ۱۰۰ مگاپاسکال در قطعه القای می‌شود. با ارتقای تجهیزات الکتریکی تهیه شده در این پژوهش، این امکان وجود دارد که تنش‌های القایی تا چندین برابر نیز افزایش داده شوند. بنابراین، به نظر می‌رسد با استفاده از تجهیزات مناسب، روش القای میدان مغناطیسی متناوب فرکانس بالا بتواند به‌عنوان یک روش جایگزین در عملیات تنش‌زدایی اتصالات جوشکاری شده مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸	

### ۱- مقدمه

القای تنش‌های دینامیکی در قطعات مکانیکی می‌تواند باعث آزاد شدن تنش‌های پسماند شود. روش‌های مختلف دینامیکی را می‌توان در سه دسته‌ی کلی روش‌های ضربه‌ای، روش‌های دامنه بزرگ و فرکانس پایین (نسبت به فرکانس طبیعی قطعه)، و روش‌های دامنه کوچک و فرکانس بالا دسته‌بندی کرد. در روش سوم نیروهای کوچکی به‌صورت متناوب و با فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی قطعه به آن وارد می‌شوند و با ایجاد تشدید، موجب القای تنش‌های بزرگی در قطعه می‌گردند. تنش‌های القایی می‌توانند با تنش‌های پسماند جمع شوند و با ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی، تنش‌های پسماند را آزاد نمایند.

در این تحقیق برای القای تنش‌های متناوب فرکانس بالا در قطعات فولادی، از میدان مغناطیسی متناوب استفاده شده است. القای میدان مغناطیسی متناوب ضمن القای تنش‌های متناوب، می‌تواند باعث افزایش دمای قطعه و تسهیل آزادسازی تنش‌های

پسماند گردد. تنش‌های پسماند ناشی از فرایند جوشکاری در ناحیه اطراف جوش، مثال خوبی برای کاربردهای این روش هستند. مزیت استفاده از روش القای میدان مغناطیسی متناوب و فرکانس بالا در آن است که این روش دارای سرعت بسیار بالایی است و بدون محدودیت مکانی می‌توان آن را برای قطعات کوچک یا بزرگ مورد استفاده قرار داد. همچنین ابزارهای لازم برای این کار را می‌توان به آسانی و با هزینه‌های نسبتاً کمی تهیه نمود.

روش تنش‌زدایی مغناطیسی یک روش نسبتاً نوین است که محدودیت‌های روش حرارتی و ارتعاشی را ندارد، به طوری که برای تمام سازه‌ها با ابعاد و وزن‌های مختلف قابل استفاده است. این روش تجهیزات بسیار ساده و کم هزینه‌ای دارد، در مدت زمان کوتاهی انجام می‌شود، و باعث تغییرات میکرو ساختاری پس از عملیات تنش‌زدایی نمی‌گردد. همچنین القای میدان مغناطیسی سبب افزایش دما در قطعه می‌شود که این عامل خود باعث تسریع در رهاسازی تنش می‌شود.

در اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی گزارش‌هایی مبنی بر افزایش قابل توجه عمر قطعات مکانیکی که تحت عملیات پالس مغناطیسی قرار می‌گیرند، منتشر گردید. مشاهدات اولیه نشان می‌داد که این عملیات موجب تغییراتی در تنش پسماند، چگالی نابجایی‌ها و ناپیوستگی‌ها می‌شود [۶-۱]. از آن زمان مطالعات بسیاری بر روی تنش‌زدایی به روش میدان مغناطیسی متغیر بر روی مواد مختلف انجام شده است که عمده آن‌ها به روش تجربی و به شکل پالسی یا فرکانس پایین بوده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به مراجع [۷-۲۳] اشاره کرد. تمام نتایج آزمایش‌های تجربی محققان حاکی از آن است که روش مغناطیسی از پتانسیل بالایی برخوردار است و می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای دیگر روش‌های تنش‌زدایی باشد.

با توجه به نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام شده [۲۴]، بیشترین تنش پسماند فرآیند جوشکاری از نوع طولی و در راستای عمود بر خط جوش می‌باشد که اندازه‌ی آن در حدود نصف تنش تسلیم قطعه می‌باشد. بنابراین تنش‌های القایی باید دارای اندازه‌ای بیش از نصف تنش تسلیم باشند تا بتوانند در دمای اتاق منجر به آزادسازی تنش پسماند شوند. شبیه‌سازی‌های انجام شده در مرجع [۲۴] نشان داد که با استفاده از یک سیم‌پیچ کوچک با هسته آهنی و با جریانی در حدود ۱ آمپر، می‌توان تنش‌هایی در حد چند ده مگا پاسکال در قطعات کوچک فولادی القا نمود. در مطالعه حاضر سعی شده است با ترکیبی از شبیه‌سازی‌های المان محدود و آزمایش‌های تجربی، نتایج مرجع [۲۴] مبنی بر امکان القای تنش‌های مکانیکی بزرگ با میدان مغناطیسی کوچک و فرکانس بالا، به صورت کیفی مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به مطالعات انجام شده بر روی پژوهش‌هایی که تاکنون منتشر شده‌اند، تنش‌زدایی مغناطیسی فرکانس بالا (در محدوده فرکانس‌های طبیعی) مورد بررسی دیگر محققان قرار نگرفته است، در حالی که انتظار می‌رود با بهره‌گیری از پدیده تشدید بتوان با نیروهای القایی بسیار کوچک‌تر و با استفاده از تجهیزات ارزان‌تر عملیات تنش‌زدایی را انجام داد. از این رو، روش معرفی شده در مطالعه حاضر برای القای تنش‌های دینامیکی، کاملاً جدید بوده و نتایج منتشر شده در این مقاله دارای هیچ مورد مشابه دیگری نیست.

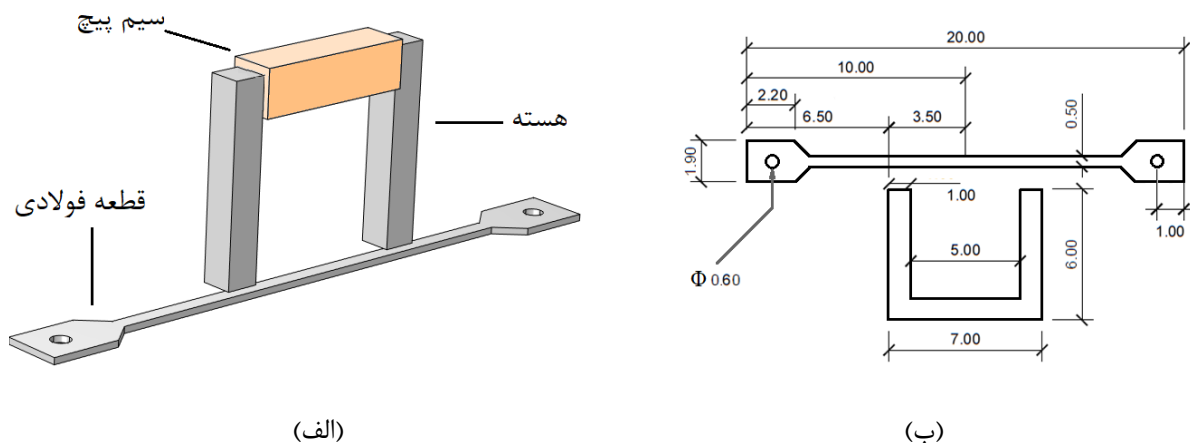
## ۲- روش و تجهیزات آزمایش

در مطالعه حاضر سعی شده است با تحریک یک قطعه فولادی در فرکانسی نزدیک شکل مود اول طولی آن، تنش‌های طولی بزرگی در قطعه ایجاد شوند. برای امکان اندازه‌گیری تنش‌های القایی، ابتدا یک دستگاه تست کشش تهیه گردید که دارای یک فک ثابت و یک فک متحرک است. فک متحرک دستگاه توسط یک پیچ قدرت جابجا می‌شود و با ثابت شدن مهره تنظیم، نمونه آزمایش تحت یک پیش کشش ثابت قرار می‌گیرد. فک ثابت دستگاه نیز به یک لودسل<sup>۱</sup> Lascaux-STC500kg وصل است تا بتواند نیروی کششی القا شده در قطعه را در حین آزمایش به دست آورد. برای نگه داشتن نمونه فولادی در فک‌های دستگاه، دو سوراخ در دو سر قطعه ایجاد گردید که امکان اتصال ثابت قطعه به فک‌ها را توسط دو پیچ فراهم می‌آورند. خروجی لودسل به یک کارت صوتی BSWA-MC3022 وصل گردید که می‌تواند برای اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق استفاده شود. استفاده از این کارت صوتی سبب گردید تا مقدار متوسط سیگنال خروجی تقریباً برابر صفر شود و در نتیجه اثر پیش تنش و یا تغییر شکل‌های

<sup>۱</sup> load cell

پلاستیک به صورت مستقیم قابل اندازه گیری نباشد.

برای القای تنش در قطعه مورد نظر، از یک سیم پیچ U شکل با هسته آهنی استفاده شده است که برای پیشگیری از ایجاد جریان‌های گردابی، هسته آن به شکل لایه لایه است. برای القای جریان متناوب در سیم پیچ نیز، از یک مدار الکتریکی نسبتاً ساده استفاده گردید که به وسیله یک ماسفت فرکانس بالا<sup>۱</sup>، جریان یک سوئه تأمین شده توسط یک منبع تغذیه DC را قطع و وصل می‌نماید. U شکل بودن هسته به این دلیل بود تا بتوان یک ناحیه بین دو بازوی هسته را با اعمال نیروهای کششی تحت بار قرار داد. شکل ۱- الف نمای از نمونه کشش و نحوه قرارگیری سیم پیچ نسبت به قطعه را نشان می‌دهد. شکل ۱ ب نیز ابعاد نمونه آزمایش و هسته‌ی سیم پیچ را برحسب میلی‌متر نشان می‌دهد. نمونه‌ی آزمایش دارای ضخامت ۲ میلی‌متر و هسته نیز دارای ضخامت ۱۰ میلی‌متر است.



شکل ۱ الف) نحوه قرارگیری هسته در کنار قطعه فولادی ب) ابعاد قطعه فولادی و هسته‌ی سیم پیچ برحسب میلی‌متر

هسته‌ی سیم پیچ در مرکز قطعه و در تماس با قطعه فولادی قرار داده می‌شود و غیر صفر بودن مقدار متوسط جریان، سبب چسبیدن هسته به قطعه می‌شود. انتظار می‌رود با القای میدان الکتریکی در سیم پیچ، نیروهای متقارن به دو سمت مرکز قطعه وارد شده و آن را تحت کشش قرار دهند. با قطع و وصل متناوب جریان سیم پیچ، این نیروها به شکل متناوب و با فرکانسی یک یا دو برابر فرکانس سوئیچینگ<sup>۲</sup> مدار (بسته به جنس هسته و قطعه و ...) قطعه را تحریک می‌نمایند. جنس قطعه مورد آزمایش از فولاد ساختمانی st37 است.

برای آنکه جریان عبوری از سیم پیچ در محدوده‌ی مناسبی قرار بگیرد که باعث آسیب به بورد الکتریکی نشود و در ضمن جریان کافی (در حدود ۱ آمپر) برای القای تنش کافی در قطعه فولادی را نیز فراهم آورد، از یک سیم پیچ با تعداد ۱۰۰ دور سیم لاکه با قطر ۰/۴۵ میلی‌متر استفاده شد که با یک مقاومت الکتریکی ۵ اهمی سری شده است. مدار الکتریکی نیز توسط یک منبع تغذیه با ولتاژ ثابت ۱۵ ولت تغذیه می‌گردد. قابل ذکر است با افزایش فرکانس تحریک، اندوکتانس<sup>۳</sup> سیم پیچ باعث کاهش جریان عبوری می‌گردد.

### ۳- نتایج تجربی

پس از ثابت شدن نمونه کشش در دستگاه تست کشش و قرار دادن هسته‌ی سیم پیچ در مجاورت آن، ولتاژهای متناوب با فرکانس متفاوت به سیم پیچ اعمال گردید. مدت زمان اعمال هر فرکانس به قطعه ۵ ثانیه و در دمای اتاق بود. فرکانس‌های اعمالی از ۱/۵ کیلوهرتز شروع و با گام ۱۰۰ هرتز تا ۲۲ کیلوهرتز افزایش یافت. نتایج به دست آمده نشان داد در فاصله‌ی فرکانسی ۱,۵

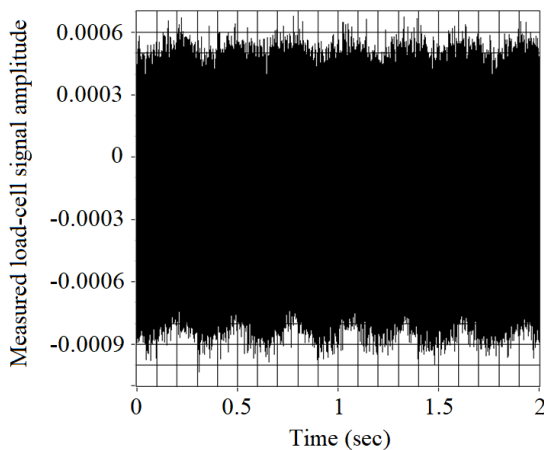
<sup>۱</sup> high-frequency MOSFET

<sup>۲</sup> Switching

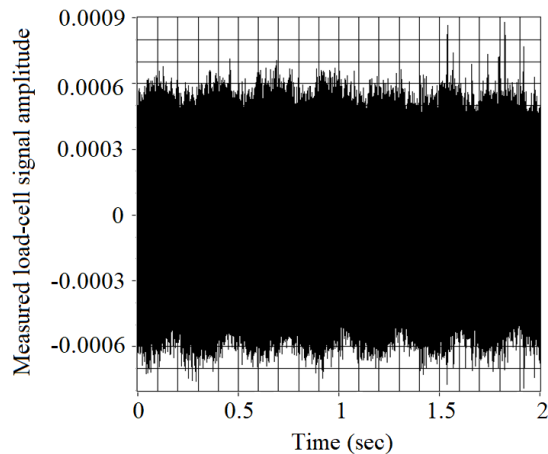
<sup>۳</sup> Inductance

تا ۱۰ کیلوهرتز، دامنه‌ی سیگنال خروجی از کارت صوتی در یک محدوده‌ی تقریباً یکسان باقی می‌ماند، سپس این دامنه به شکل چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با نزدیک شدن به فرکانس ۲۰ کیلوهرتز که نزدیک فرکانس طبیعی شکل مود اول طولی قطعه است، دامنه‌ی سیگنال دوباره افزایش یافته و به مقادیری مشابه با دامنه‌ی سیگنال در بازه‌ی ۱/۵ تا ۱۰ کیلوهرتز قرار می‌گیرد. پس از آن در فاصله‌ی ۲۰ تا ۲۲ کیلوهرتز دامنه‌ی سیگنال به شدت افت می‌کند. شکل ۲ دامنه‌ی سیگنال خروجی از دیتالاگر<sup>۱</sup> (کارت صوتی) را برای فرکانس‌های ۲، ۱۰ و ۲۰ کیلوهرتز نمایش می‌دهد.

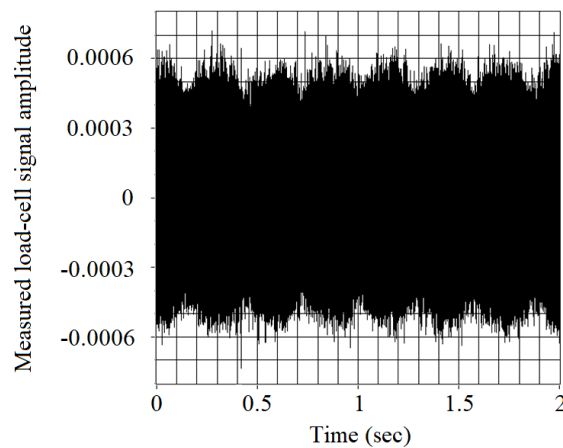
(a)  $f = 2000$  (Hz)



(b)  $f = 10000$  (Hz)



(c)  $f = 20000$  (Hz)

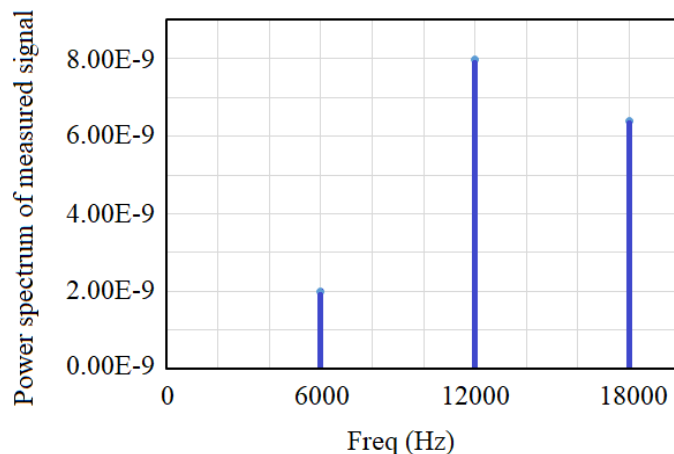


شکل ۲ سیگنال خروجی دیتالاگر در پاسخ به فرکانس‌های تحریک مختلف

از آنجایی که ولتاژ تحریک از نوع مربعی است، می‌توان انتظار داشت در صورتی که جریان الکتریکی القایی نیز مربعی باشد، سیگنال نیروی اندازه‌گیری شده توسط لودسل شامل هماهنگ‌های فرد فرکانس تحریک باشد. در عمل به دلیل اندوکتانس سیم‌پیچ و ارتعاشات قطعه فولادی و خود سیم‌پیچ، جریان القایی در سیم‌پیچ به شکل یک سیگنال مربعی نیست. تحلیل‌های فرکانسی انجام‌شده بر روی نتایج تجربی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد سیگنال خروجی لودسل، نه تنها شامل هماهنگ‌های فرد سیگنال تحریک است، دربرگیرنده‌ی هماهنگ‌های زوج این سیگنال نیز می‌باشد. وجود این هماهنگ‌ها نشان می‌دهد که در

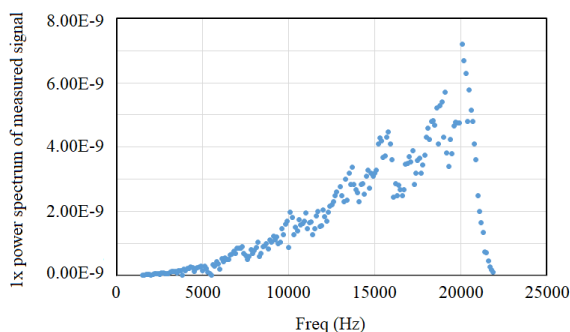
<sup>۱</sup> data logger

زیرهارمونی‌های فرد و زوج فرکانس تحریک نیز احتمال رخداد رزونانس وجود دارد. این موضوع می‌تواند توجیه خوبی برای این سؤال باشد که چرا دامنه‌ی سیگنال پاسخ تقریباً در تمام محدوده‌ی زیر نصف فرکانس طبیعی، هم‌مرتبه‌ی سیگنال پاسخ در نزدیکی فرکانس طبیعی قطعه فولادی است. شکل ۳ به‌عنوان نمونه، طیف توان سیگنال خروجی دیتالاگر را برای فرکانس تحریک ۶ کیلوهرتز نمایش می‌دهد.

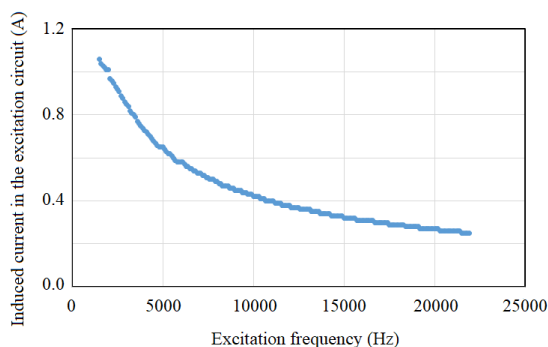


شکل ۳ طیف توان سیگنال اندازه‌گیری شده در فرکانس تحریک ۶ کیلوهرتز

برای ارزیابی تغییرات دامنه سیگنال پاسخ در فرکانس‌های تحریک مختلف، دامنه‌ی طیف توان هم‌هنگ اول سیگنال اندازه‌گیری شده در شکل ۴-الف بر حسب فرکانس تحریک نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد با افزایش فرکانس تحریک، دامنه توان سیگنال در هم‌هنگ اول، به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه در فرکانس ۲۰٫۱ کیلوهرتز که نزدیک فرکانس طبیعی اول قطعه در ارتعاشات طول است، به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. شکل ۴-ب نیز جریان القایی در سیم‌پیچ را در ولتاژ ثابت ۱۵ ولت نمایش می‌دهد. چنانکه در شکل دیده می‌شود، افزایش امپدانس الکتریکی مدار باعث کاهش چشم‌گیر جریان القایی شده است. برای آنکه تخمینی از توان سیگنال پاسخ در جریان ۱ آمپر داشته باشیم، با تقسیم توان بر جریان، تغییرات توان سیگنال در هم‌هنگ اول به شکل نرمال شده نسبت به جریان، در شکل ۵ رسم شده است.

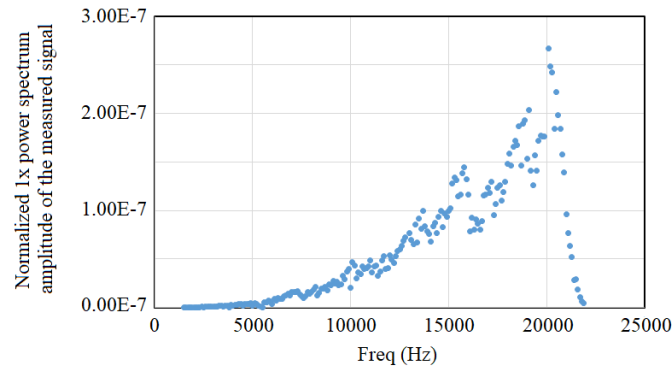


(الف)



(ب)

شکل ۴ الف) نمودار دامنه طیفی توان سیگنال اندازه‌گیری شده در هم‌هنگ اول، ب) جریان القا شده در مدار سیم پیچ در ولتاژ تغذیه ثابت ۱۵ ولت و در فرکانس‌های تحریک مختلف



شکل ۵ نمودار نرمال شده دامنه طیفی توان سیگنال اندازه گیری شده در هماهنگ اول نسبت به جریان مدار

برای برآورد تنش القاشده در قطعه، باید رابطه‌ی نهایی بین ولتاژ خروجی لودسل و دامنه‌ی طیف توان به دست آمده در نرم افزار LabVIEW را به دست آورد. باید توجه داشت که یک دیتالاگر (داده بردار) در میان لودسل و کامپیوتر قرار گرفته است که باعث ایجاد تبدیل‌هایی در سیگنال اندازه‌گیری شده می‌شود.

در ابتدا با متصل کردن دیتالاگر به یک سیگنال ژنراتور و اعمال ولتاژهای متفاوت و با فرکانس‌های مختلف، مقدار طیف توان و دامنه را مطابق جدول در فرکانس تحریک مختلف به دست می‌آوریم. به لحاظ تئوری طیف توان برابر توان دوم دامنه در تبدیل فوریه‌ی سریع است.

جدول ۱ مقدار طیف توان و دامنه سیگنال خروجی دیتالاگر به ازای ولتاژهای ورودی و فرکانس‌های تحریک مختلف

ولتاژ تحریک (میلی ولت)	فرکانس تحریک (هرتز)	دامنه طیف توان سیگنال اندازه‌گیری شده	دامنه سیگنال اندازه‌گیری شده
۲۰	۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۹۲
۲۰	۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۹
۲۰	۵۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۱	۰/۰۰۸
۲۰	۱۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۰۸
۲۰	۱۵۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۶	۰/۰۰۸۴
۲۰	۲۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۷۵	۰/۰۰۸۶
۴۰	۱۵۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱۴۵
۴۰	۲۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۱۴۵

با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود بین طیف توان و توان دوم دامنه یک رابطه تقریباً خطی برقرار است:

$$Kz = \sqrt{PS}/Z \quad (1)$$

که در آن Z دامنه‌ی سیگنال، PS طیف توان و Kz ضریب تبدیل است. برای به دست آوردن ضریب تبدیل، با جاگذاری اندازه طیف توان و دامنه‌ی به دست آمده در فرکانس ۲۰۰۰۰ هرتز در رابطه (۱) داریم:

$$Kz = \sqrt{0.00011}/0.0145 = 0.723$$

اکنون می‌توان نتایج طیف توان بدست آمده در شکل ۵ که مربوط به آزمایش‌های القای تنش می‌باشند را با استفاده از رابطه‌ی ۱ به دامنه سیگنال تبدیل نمود:

$$Z = \sqrt{PS}/Kz \quad (2)$$

که در آن Z دامنه سیگنال است.

با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود بین دامنه‌ی سیگنال اندازه‌گیری شده و ولتاژ داده شده به دیتالاگر نیز رابطه‌ای تقریباً خطی برقرار است:

$$Kv = Z/V \quad (۳)$$

که در آن  $Z$  دامنه‌ی سیگنال اندازه‌گیری شده،  $V$  ولتاژ لودسل (ورودی دپتالاگر) و  $Kv$  ضریب تبدیل ولتاژ به دامنه سیگنال است. با توجه به جدول ۱، با اعمال سیگنال ۴۰ میلی ولت دامنه‌ای به مقدار ۰/۰۱۴۵ تولید می‌شود. بنابراین، مطابق رابطه‌ی ۳ خواهیم داشت:

$$Kv = \frac{0.0145}{40} = 0.0003625 \left(\frac{1}{mV}\right)$$

مطابق مشخصات اعلامی سازنده برای لودسل، در حداکثر بار دستگاه که ۵۰۰ کیلوگرم است، به ازای یک ولت ولتاژ تغذیه، ۲ میلی ولت ولتاژ خروجی داریم. از آنجایی که تغذیه لودسل در این آزمایش ۵ ولت می‌باشد، لذا ولتاژ خروجی در نیروی ۵۰۰ کیلوگرم برابر ۱۰ میلی ولت است. با توجه به اطلاعات لودسل، می‌توان با استفاده از فرمول زیر رابطه بین نیروی اعمالی به لودسل و ولتاژ خروجی لودسل در تغذیه ۵ ولت را به دست آورد:

$$Kp = V/P \quad (۳)$$

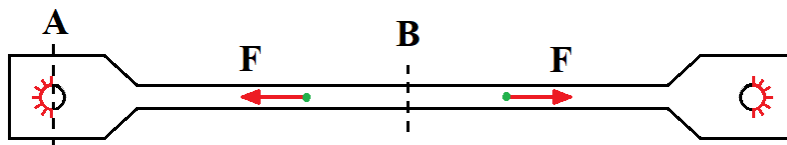
که در آن  $P$  نیرو لودسل و  $V$  ولتاژ خروجی لودسل است. برای لودسل استفاده‌شده در این آزمایش، ضریب تبدیل نیرو به ولتاژ مطابق زیر به دست می‌آید:

$$Kp = \frac{10}{500} = 0.02 \left(\frac{mV}{kg}\right)$$

با استفاده از ضرایب تبدیل به دست آمده و رابطه نهایی  $P = \sqrt{PS}/(Kz * Kv * Kp)$ ، نیروی اعمال شده به لودسل در فرکانس تحریک ۲۰/۱ هرتز برابر با ۵۰/۷۹ کیلوگرم و یا ۴۹۷/۷ نیوتن تخمین زده می‌شود. در نتیجه تنش متوسط اعمال شده در تکیه‌گاه قطعه (مقطع مجاور سوراخ) برابر ۱۹،۱ مگا پاسکال محاسبه می‌گردد.

#### ۴- برآورد تنش در مقاطع دیگر و شرایط مرزی آزاد

در تنش زدایی باید تلاش شود که تنش در ناحیه مورد نظر به حد پلاستیک رسانده شود، بدون آنکه در دیگر نواحی تغییر شکلی ناخواسته ایجاد شود. همچنین مطلوب آن است که قطعه بدون قرار گرفتن در هیچ‌گونه فیکسچری<sup>۱</sup> و در حالت آزاد تحت عملیات تنش زدایی قرار گیرد. در تحقیق حاضر فرض شده است که خواسته باشیم قطعه معرفی شده در بخش‌های قبل را در حالت آزاد تحت عملیات قرار داده و تنش القایی در مرکز قطعه را تخمین بزنیم. به این منظور ابتدا تلاش شده است تا با استفاده از شبیه‌سازی‌های المان محدود، برآوردی از نیروی القا شده توسط میدان مغناطیسی را در آزمایش‌های تجربی پیش گفته بدست آوریم، سپس به کمک نیروی تخمین زده شده و با شبیه‌سازی‌های بیشتر، تنش القایی در مرکز قطعه و در حالت شرایط مرزی آزاد را تخمین بزنیم. برای این کار ابتدا فرض شده است نیروی سیم پیچ به شکل دو نیروی معکوس به ناحیه بین دو بازوی هسته وارد شود و قطعه نیز در دو سوراخ دو سر خود کاملاً ثابت شده باشد. همچنین فرض شده است هسته سیم پیچ نسبت به مرکز قطعه به اندازه ۵ میلی‌متر به یکی از دو سر قطعه متمایل شده باشد. با در نظر گرفتن این فرضیات یک مدل المان محدود از این قطعه در نرم افزار کامسول<sup>۲</sup> تهیه گردید. در این شبیه‌سازی چگالی قطعه برابر ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳۳ فرض شد. همچنین فرض شد قطعه مورد بررسی در دو فرکانس طبیعی اول و دوم خود دارای نسبت میرایی ۰/۰۰۱ باشد.

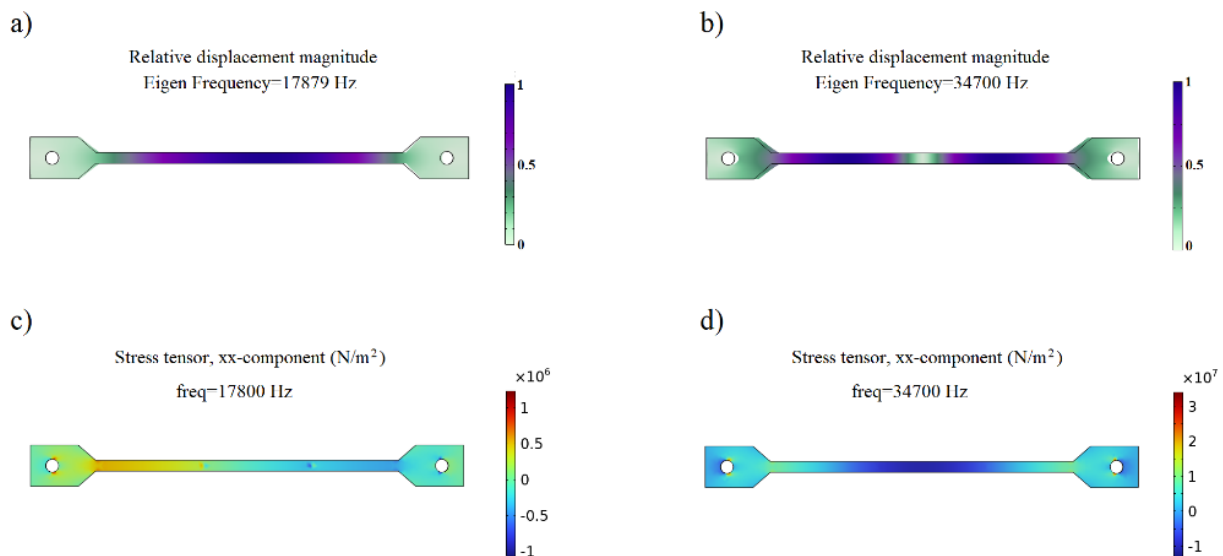


شکل ۶ نیروهای اعمال شده به قطعه و شرایط مرزی شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول

<sup>۱</sup> Fixture

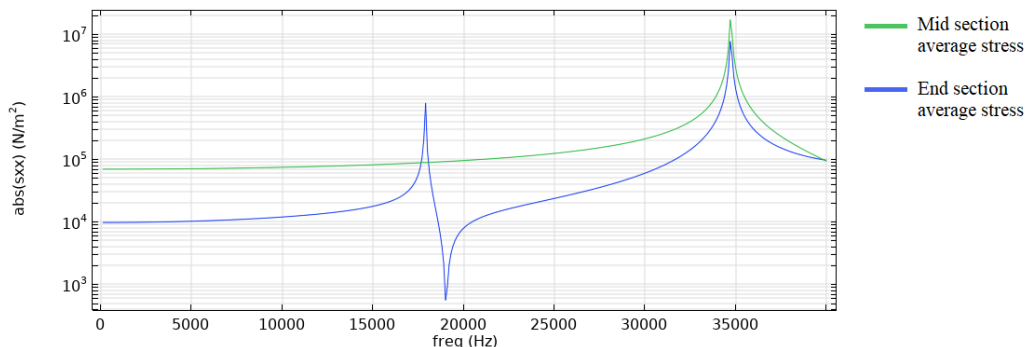
<sup>۲</sup> COMSOL

قطعه مورد نظر در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی گردید و با فرض جابجایی درون صفحه‌ای، پاسخ قطعه به نیروهای هارمونیک نشان داده شده در فرکانس‌های مختلف بررسی شد. در این شبیه‌سازی دامنه نیروی اعمالی برابر ۱ نیوتون فرض شد و گام تغییر فرکانس نیز برابر ۱۰۰ هرتز قرار داده شد. شکل مودهای درون صفحه‌ای و پاسخ هارمونیک قطعه به نیروی‌های اعمالی در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس‌های طبیعی در شکل ۷ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌گردد در فرکانس طبیعی اول (۱۷۸۷۹ هرتز) بیشترین جابجایی در راستای x (راستای طولی قطعه) و در وسط قطعه اتفاق می‌افتد، درحالی‌که در فرکانس طبیعی دوم (۳۴۷۰۰ هرتز) جابجایی قطعه برابر صفر است. تنش‌های طولی متناظر با فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی اول و دوم، در شکل‌های ۷ الف و ۷ ب نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل، در فرکانس طبیعی اول، تنش طولی در وسط قطعه نزدیک به صفر و در دو تکیه‌گاه دارای مقدار بیشینه است. در فرکانس طبیعی دوم نیز، در وسط و دو سر قطعه، تنش‌های طولی به بیشترین مقدار خود می‌رسند.



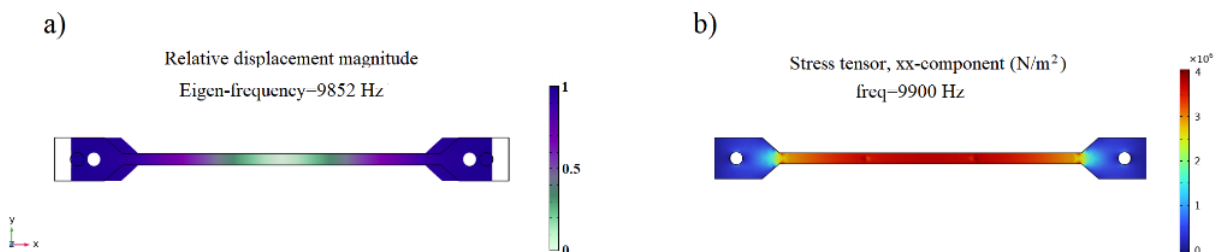
شکل ۷- مودهای اول و دوم ارتعاش طولی و تنش متناظر به ارتعاشات اجباری قطعه در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی اول و دوم قطعه

شکل ۸ نیز منحنی پاسخ فرکانسی قطعه در مقاطع میانی (مقطع B شکل ۶) و تکیه‌گاهی (مقطع A شکل ۶) قطعه را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری تنش در مقطع میانی، نقطه وسط این مقطع، و برای مقطع تکیه‌گاهی، نقطه‌ای در وسط مقطع در بخش بالایی سوراخ انتخاب گردید. در این دو نقطه، تنش طولی تقریباً برابر تنش متوسط در کل مقطع است. ملاحظه می‌شود در فرکانس تحریک ۱۷۸۰۰ هرتز، تنش در مقطع تکیه‌گاهی برابر ۸۰۰ کیلوپاسکال و در مقطع میانی برابر ۸۸ کیلوپاسکال است. در فرکانس ۳۴۷۰۰ هرتز نیز، تنش طولی در مقطع تکیه‌گاهی برابر ۷/۶ مگاپاسکال و در مقطع میانی برابر ۱۷ مگاپاسکال است. بنابراین در فرکانس تحریکی نزدیک به فرکانس طبیعی دوم، می‌توان تنش‌های طولی بسیار بزرگ‌تری در این دو مقطع به دست آورد. از آنجایی که تجهیزات تهیه شده در این تحقیق امکان مطالعه در فرکانس‌های بالاتر از ۲۲ کیلوهرتز را فراهم نمی‌کنند، در ادامه مطالعه خود را به فرکانس طبیعی اول محدود می‌کنیم. در بخش تجربی این مطالعه، مقدار تنش ۱۹,۱ مگاپاسکال برای مقطع تکیه‌گاهی به دست آمد، که تقریباً ۲۳/۹ برابر تنش به دست آمده برای مقطع تکیه‌گاهی (۸۰۰ کیلوپاسکال) به ازای دامنه ۱ نیوتونی نیروی تحریک است. بنابراین با استفاده از یک رابطه تناسبی می‌توان دامنه نیروی تحریک در مطالعه تجربی را به صورت تخمینی برابر ۲۳/۹ نیوتون تقریب زد.

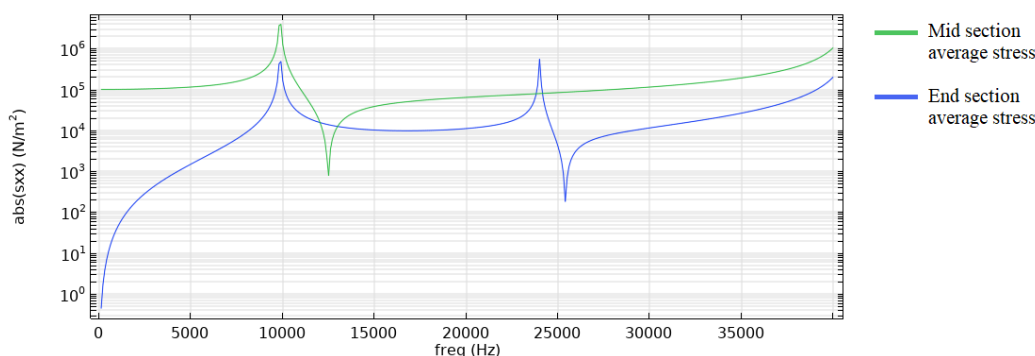


شکل ۸- منحنی پاسخ فرکانسی قطعه در مقاطع میانی و تکیه‌گاهی قطعه به ازای نیروی تحریک ۱ نیوتونی

حال قطعه را در شرایط مرزی کاملاً آزاد در نظر می‌گیریم. در این حالت فرکانس طبیعی اول قطعه برابر ۹۸۵۲ هرتز است. شکل مود طبیعی اول قطعه در شکل ۹ الف و تنش‌های طولی متناظر با قطعه تحریک هارمونیک ۱ نیوتونی در فرکانس ۹۹۰۰ هرتز در شکل ۹ ب نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۰ نیز منحنی پاسخ فرکانسی تنش در دو مقطع میانی و تکیه‌گاهی نیز نشان داده شده‌اند. در این حالت بیشترین تنش طولی در مقطع میانی قطعه رخ می‌دهد. و برابر ۴ مگاپاسکال است. تنش طولی متوسط در مقطع میانی نیز برابر ۵۰۰ کیلوپاسکال است. حال اگر فرض کنیم دامنه‌ی نیروی تحریک واقعی با توجه به تجهیزات تهیه‌شده و آزمایش‌های انجام‌شده برابر ۲۳/۹ نیوتون است، می‌توان انتظار تنش طولی ۹۵/۶ مگاپاسکالی در مقطع طولی را داشت. بدیهی است با ارتقای تجهیزات تهیه شده، به‌سادگی می‌توان به مقادیر تنش القایی چند صد مگاپاسکالی در مقاطع میانی رسید که برای آزادسازی تنش‌های پسماند بسیار مناسب است.



شکل ۹- مود اول ارتعاش طولی و تنش متناظر به ارتعاشات اجباری قطعه در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی اول



شکل ۱۰- منحنی پاسخ فرکانسی قطعه در مقاطع میانی و تکیه‌گاهی قطعه به ازای نیروی تحریک ۱ نیوتونی برای شرایط مرزی آزاد

## ۵- جمع‌بندی

در این تحقیق القای تنش‌های دینامیکی و فرکانس بالا به‌صورت القای مغناطیسی در یک قطعه فولادی به روش ترکیبی

تجربی-المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی، با استفاده از تجهیزات ساده و ارزان قیمت الکتریکی و با القای جریان متناوب و غیرهارمونیک در یک سیم پیچ با هسته U شکل، قطعه فولادی تحت تنش‌های متناوب قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد به دلیل غیرهارمونیک بودن جریان القایی و با ایجاد تشدید در فرکانس طبیعی و یا زیرهارمونی‌های آن، می‌توان در طیف وسیع از فرکانس‌های تحریک که کمتر از نصف فرکانس طبیعی هستند و همچنین در خود فرکانس طبیعی، تنش‌های بزرگی به قطعه اعمال نمود. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که تنش القا شده در قطعه فولادی دارای مقدار قابل توجهی است و با ارتقا تجهیزات مورد استفاده می‌توان به تنش‌های کافی برای فرایند آزادسازی تنش‌های پسماند رسید. در بخش شبیه‌سازی المان محدود با تعمیم دادن نتایج بدست آمده برای شرایط مرزی دو سرگیردار به شرایط مرزی آزاد، نشان داده شد در فرکانس‌های تحریک پایین‌تر، می‌توان به کمک پدیده تشدید، تنش‌های القایی بزرگی به مقاطع میانی قطعه القا نمود. مطالعه انجام شده در این تحقیق محدود به ولتاژ القایی مربعی بود. پیشنهاد می‌شود با عوض کردن نوع تحریک، این مطالعه گسترش داده شود. همچنین برای بررسی میزان آزادسازی انجام شده، پیشنهاد می‌گردد از روش‌های تست میکرو یا نانو سختی‌سنجی و همچنین تصویربرداری XRD استفاده گردد.

### Authorship Contribution Statement

Dr. Sirwan Farhadi



**Biography:** Sirwan Farhadi received a B.Sc. in Mechanical Engineering from K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, in 2002. Then he received his M.Sc. and Ph.D. in Mechanical Engineering- Applied Design from Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, in 2004 and 2009, respectively. Since 2010 he has been an Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj. His Major interest is the design and study of applied multi-physic systems, including aeroelasticity, electromagnetic stress relaxation, vibration control, rotor dynamics, and robotics.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Methodology, Setup preparation, Experiments, Data Analysis, Supervision, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Mohammad Aslani



**Biography:** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering University of Kurdistan

**Contribution Statement:** Resources, Setup preparation, Experiments, Data Analysis.

### ۶-مراجع

- [1] Jablonowski J, Pulsed Magnetism Boosts Tool Life. American Machinist and Automated Manufacturing. 1987; 31: 80-82.
- [2] Fahmy Y, Hare T, Tooke R, Conrad H, Effects of a Pulsed Magnetic Treatment on the Fatigue of Low Carbon Steel. Scripta Materialia. 1998; 35: 1355-1358.
- [3] Hochman R F, Drits V, Tselesin N, Magnetic Fields: Fertile Ground for Metals Processing. Advanced Materials and Processes. 1988; 154: 230-235.
- [4] Milton R, Relaxing stresses to better tool life, Mod. Mach. Shop March.1988; 64-69.
- [5] Su Y Y, Hochman R F, Schaffer J P, A Positron Annihilation Spectroscopy Investigation of Magnetically Induced Changes in Defect Structure. Journal of Physics C (Condensed Matter). 1990; 2: 3629-3642.
- [6] Hochman R F, Drits V, Tselesin N, Surface Modification by Magnetic Treatment. Encyclopedia of Materials Science and Engineering. 1994; 2037.

- [7] Luo X J, Research on residual stress relieving in welded structure with magnetic field (Doctoral dissertation, M. Sc. Dissertation, Tsing Hua University, Beijing, 1995, (in Chinese).
- [8] Lu A L, Tang F, Luo X J, Mei J F, Fang H Z, Research on residual stress reduction by strong pulsed magnetic treatment. *Journal of materials processing technology*. 1998; 74: 259-262.
- [9] Tang F, Lu, A L, Mei J F, Fang H Z, Luo X J, Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field. *Journal of Materials Processing*; 1998; 74: 255-258.
- [10] Klamecki B E, Residual stress reduction by pulsed magnetic treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 141: 385-394.
- [11] Zhipeng C, Lin J, Zhao H, Lu A, Orientation Effect in Pulsed Magnetic Field Treatment. *Material Science and Engineering*; 2005; 398: 344-348.
- [12] Song, Y., Hua, L. and Wang, B., Reduction of residual stress in low alloy steel with magnetic treatment in different directions. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2009; 24: 857-862.
- [13] Gexin C, Yuming F, Jing Y, Wei L, The Residual Stress Analysis of Aluminum Alloy Alternating Magnetic Treatment after Cold Plastic Forming. In 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. 2010; 3108-3111. IEEE.
- [14] Huang X, Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current. *Materials Science and Engineering*. 2011; 528(19-20): 6287-6292.
- [15] Song Y, Hua L, Mechanism of residual stress reduction in low alloy steel by a low frequency alternating magnetic treatment. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012; 28(9): 803-808.
- [16] Shao Q, Kang J, Xing Z, Wang H, Huang Y, Ma G, Liu H, Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019; 476: 218-224.
- [17] Zhang, X, Zhao, Q, Cai, Z, Pan, J, Effects of magnetic field on the residual stress and structural defects of Ti-6Al-4V. *Metals*. 2020; 10: 141.
- [18] Hou M, Li K, Li X, Zhang X, Rui S, Wu Y, Cai Z, Effects of pulsed magnetic fields of different intensities on dislocation density, residual stress, and hardness of Cr4Mo4V steel. *Crystals*. 2020; 10: 115.
- [19] Zhong F, Wang J, Zhang Q, Huang J, Wang W, Xu J, Huang K, Qin Y, Residual stress reductions of carbide cutting tools through applying pulsed magnetic field and coupled electromagnetic field–mechanism analysis and comparison study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; 121: 4757-4775.
- [20] Huang, G, Liu, R, Hu, S, Modeling study of mesoscale magnetic treatment influencing factors through dynamic softening analysis. *Results in Physics*. 2023; 53: 107015.
- [21] Huang G, Li B, The combined magnetic-vibration stress relief. *Results in Physics*. 2023; 47: 106372.
- [22] Huang G, Liu R, Hu S, Investigation of the mechanism for reduction of residual stress through magnetic-vibration stress relief treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023; 582: 171041.
- [23] Ashi L, Xie Z, Sun H, Wang J, Huang K, Effect of electromagnetic coupling treatment on the residual stress relief and mechanical properties of 7050 aluminum alloy. *Journal of Materials Science*. 2023; 58: 12097-12117.
- [24] Nouri Z. Investigating the effect of magnetic volumetric forces on the release of residual stresses in welding. Master's thesis. University of Kurdistan. 2019.