Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(5) (2020) 317-320
DOI: 10.22060/mej.2019.14857.5960

Design and Simulation of a Dual-State Quartz Resonator Force Sensor

M. M. Mohamamdi*

Mechanical engineering group, engineering department, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ABSTRACT: Quartz crystal is a piezoelectric material which is used as the sensing element in resonator load cells and temperature sensors. In the resonator force sensors, upon force-frequency effect, the resonance frequency of the quartz crystal is changed when the crystal is subjected to external forces. The amount of frequency shift depends on the temperature of the crystal. In this article, a new quartz resonator force sensor is designed and simulated. The sensor is working based on the force-frequency effect and has two working states with different loading conditions. At the first state, the force sensitivity of the sensor is maximum, and at the second loading state, the temperature effect on the force sensitivity may be minimum. The frequency shift of the load sensor is calculated by the combination of the mathematical modelling and finite element method. The simulations are performed at a temperature range of (0-100 °C). The effect of force azimuth angles and the length of flats of the resonator disk on the force sensitivity and temperature error of the sensitivity are evaluated. The designed double state sensor gives us the opportunity to increase the resolution and precision of force measurement at room temperature, and reduce the thermal error at other temperatures.

Review History:

Received: 8/19/2018
Revised: 12/11/2018
Accepted: 12/27/2018
Available Online: 1/28/2019

Keywords:

Dual-state force sensor
Quartz
Force-frequency effect
Temperature error
Sensitivity

1. INTRODUCTION

Ratajski [1] defined the force-frequency coefficient for crystal resonators in 1965 and calculated this coefficient for AT-Cut quartz crystal. Based on the force-frequency effect, researchers developed lots of load sensors and pressure gauges using quartz resonators [2, 3]. The sensitivity of these sensors was determined by the force-frequency coefficient of their resonating crystal. Due to the effect of temperature on the force-frequency coefficients, researchers tried to compensate for the temperature error on the sensitivity of the force and pressure sensors. for this, they used compensating electrical circuits or changed the design parameters of resonating crystal, force azimuth angle, and the electrode geometry and situation, to reduce the thermal error [4, 5]. Also, some researchers have designed resonator load cells which can vibrate in two different vibrating modes with different sensitivities to the temperature. The temperature error compensation was performed by comparing the frequency changes of these modes [6].

In this article, a new force sensor is designed which is capable of working in two different states with different force sensitivities and temperature error. At the first state, the force sensitivity of the sensor is maximum, and at the second loading state, the temperature effect on the force sensitivity may be minimum. The force-frequency effect at the quartz resonator disk with two pair of opposing flats is simulated at a temperature range of 0 to 100°C.

2. DUAL STATE RESONATOR FORCE SENSOR

Resonator force sensors work on the principle of force-frequency effect. Accordingly, the resonance frequency of the quartz crystal changes by the application of diametric forces. The force azimuth angle affects the frequency change. Also, the temperature can change the force-frequency coefficient of the crystal [7]The amount of variation in the force-frequency coefficient, due to the temperature change, depends on the force azimuth angle.

Our design (Fig. 1) includes a circular quartz disk with two pair of flat edges. Each double flat has a predetermined azimuth angle with axis x_1 of the AT-Cut resonator. The force is applied by the upper anvil, and the lower screw pin is fixed during application of the force. To change the loading state, the second anvil and screw pin attach the resonator instead of the previous ones. The azimuth angles of flat pairs are determined in a way that the force sensitivity of the first loading state becomes maximum and for the second state, the temperature error of the force-frequency coefficient becomes minimum.

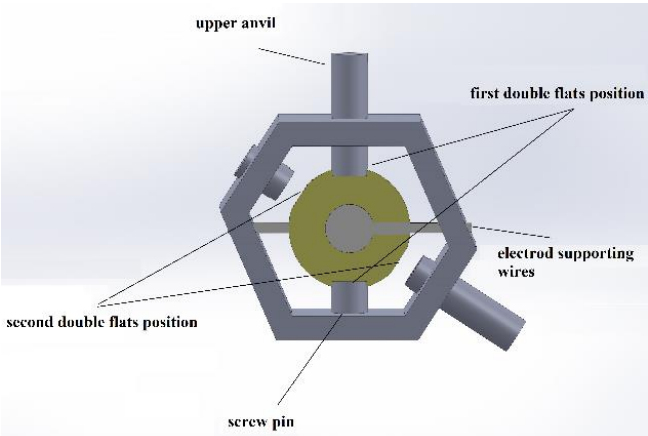


Fig. 1: Schematic model of a dual-state quartz sensor

*Corresponding author's email: dr.mohammadi@znu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

A mathematical model has been developed previously for calculation of the frequency shift of an AT-Cut resonator, subjected to diametric forces at different temperatures [7] Accordingly, the frequency shift is calculated by Eq. (1):

$$\frac{\Delta f}{f_0} = (U_{1,1}^{(0)})_m + \frac{1}{2C_{66}^{\theta}} C_{661}^{\theta}(E_1^{(0)})_m + C_{662}^{\theta}(E_2^{(0)})_m + C_{663}^{\theta}(E_3^{(0)})_m + C_{664}^{\theta}(E_4^{(0)})_m \quad (1)$$

where is the variation of the fundamental thickness shear frequency and f_0 is the fundamental cutoff frequency of AT-Cut quartz, $(U_{1,1}^{(0)})_m$ is the zero-order component of the initial displacement, $(E_i^{(0)})_m$ is the mechanical part of zero-order initial strains, C_{66}^{θ} and C_{66i}^{θ} are second- and third-order elastic constants of AT-Cut quartz crystal, respectively. Superscript θ shows the dependence of the parameters on the temperature, and subscript m shows the mechanical source of the parameter. The initial strains in the Eq. (1) may be determined numerically by Finite Element Method (FEM) [7]

In this paper, the zero order strain components were evaluated for the double state force sensor. Accordingly, the frequency shift and force-frequency coefficient were determined for the sensor. For validation of the force-frequency model, the force-frequency coefficients were evaluated for AT-Cut quartz disks at 25 and 78°C. The results were in close accordance with the experimental results published in the literature [8].

3. RESULTS AND DISCUSSION

The design parameters of the dual-state sensor, are the azimuth angle of double flats, and the edge length of flats. For determining the azimuth angle of the first loading state (ψ), the azimuth angle of the second flats pair (φ), was kept constant. Then, the force-frequency constants were evaluated as a function of the azimuth angle (ψ). Fig. 2 represents the results.

As shown in Fig. 2, the force-frequency coefficients are maximum when ψ is between -20° and 9°. At the angle 9°, the flat pairs contact with each other and the force-frequency

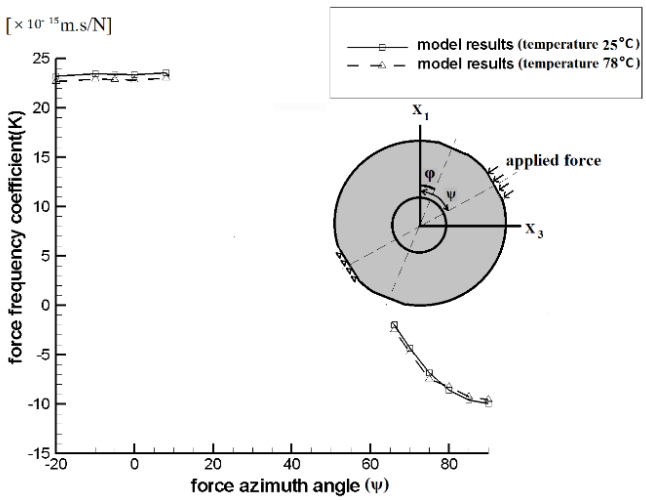


Fig. 2: Force-frequency coefficients of the sensor at the first working state at 25°C and 78°C

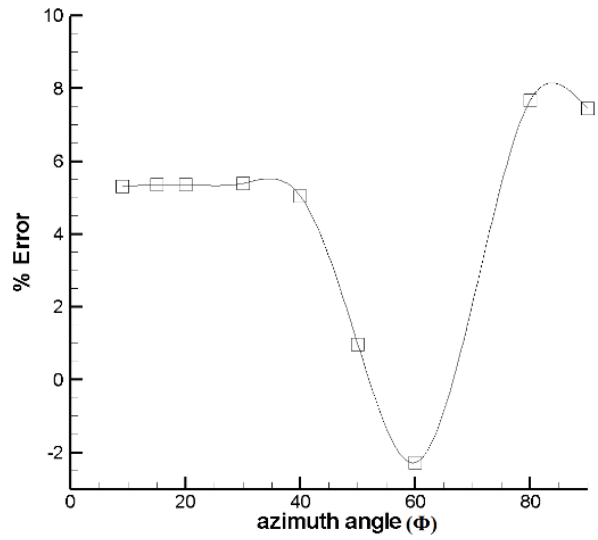


Fig. 3: The temperature error of force frequency coefficients between 25°C and 100°C

constant were not evaluated in the contact region. To have the maximum distance between the flat pairs, the angle $\psi = -20°$ was chosen for the first working state of the sensor.

For determining the second azimuth angle (φ), the first azimuth angle was considered to be $-20°$, and the temperature error on force frequency coefficients was evaluated at the temperature range of 0°C -100°C. The results have presented in Fig. 3.

Upon the error curve in Fig. 3, the temperature error of the sensitivity at $\varphi = 53°$ is almost zero. The force-frequency coefficient at this angle is 7.43×10^{-15}m.s/N . This angle may be chosen for the double flats of the second working state of the sensor Also, higher sensitivities may be achieved if a definite temperature error would be acceptable for the second working state. For example, at angle $\varphi = 50°$ the temperature error is 1% and the force-frequency coefficient is 9×10^{-15}m.s/N .

In addition to the azimuth angle analysis, the effect of flats length on the force-frequency coefficients was evaluated in the manuscript. Simulations showed that by decreasing the edge length, the force-frequency coefficients may increase.

4. CONCLUSIONS

The dependency of the force-frequency coefficient in quartz resonators to temperature and force azimuth angle gives us the opportunity of designing double state force sensors. This sensor may work at two different working state. At the first state, the force sensitivity of the sensor is maximum, and at the second loading state, the temperature effect on the force sensitivity may be minimum. By analyzing the variation of force frequency coefficient at different azimuth angles and temperatures, the force azimuth angles for these states were determined. Also, the effect of flats length on force frequency coefficients was evaluated.

REFERENCES

[1] J. Ratajski, Force-frequency coefficient of singly rotated vibrating quartz crystals, IBM Journal of Research and Development, 12(1) (1968) 92-99.

[2] R. Langdon, Resonator sensors-a review, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 18(2) (1985) 103.
[3] D.L. Hammond, A. Benjaminson, The crystal resonator-a digital transducer, IEEE spectrum, 6(4) (1969) 53-58.
[4] Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, G. Feng, Off-centre load-insensitive digital quartz resonator force sensor, IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 148(5) (2001) 215-220.
[5] A. Asakura, T. Fukuda, F. Arai, Design, fabrication and characterization of compact force sensor using AT-cut quartz crystal resonators, in: Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 2008, pp. 506-511.
[6] Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, G. Feng, A thickness-shear quartz resonator force sensor with dual-mode temperature compensation, IEEE sensors journal, 3(4) (2003) 490-496.
[7] M. Mohammadi, M. Hamedi, H. Daneshpajooh, High-frequency vibrations of quartz crystals subject to initial thermo-mechanical bias, Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering, 24(2) (2017) 684.
[8] E.P. Eernisse, Temperature dependence of the force frequency effect for the AT-, FC-, SC-, and rotated X-cuts, in: 34th Annual Symposium on Frequency Control. 1980, IEEE, 1980, pp. 426-430.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۵، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۲۷۳ تا ۱۲۸۴
DOI: 10.22060/mej.2019.14857.5960

طراحی و شبیه‌سازی حسگر نیروی دو حالته کوارتزی

محمد مصطفی محمدی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

خلاصه: کریستال کوارتز ماده‌ای پیزوالکتریک است و با اعمال ولتاژ متناوب، می‌توان در آن ارتعاش مکانیکی ایجاد کرد. فرکانس طبیعی این ارتعاش با اعمال تنش و تغییر دمای کریستال تغییر می‌کند. به همین علت از این کریستال در ساخت انواع نیروسنج‌ها و حسگرهای دمایی استفاده می‌شود. در این مقاله یک حسگر نیروی دیجیتال بر اساس اثر نیرو-فرکانس در کریستال کوارتز با برش آ.تی طراحی و شبیه‌سازی شده است. این حسگر در دو مود کاری قابل فعال‌سازی است. در مود اول، حساسیت حسگر نسبت به نیرو بیشینه است. در مود دوم خطای دمایی حسگر کاهش می‌یابد. خروجی حسگر با ترکیب روش المان محدود و مدل‌سازی ریاضی بدست آمده است. جهت ارزیابی مدل از مطالعات تجربی پیشین درباره ضریب نیرو فرکانس استفاده شده است. همچنین اثر زوایا و طول لبه تکیه‌گاه‌های اعمال نیرو بر خطای دمایی حسگر و حساسیت آن در مودهای کاری بررسی شده است. خروجی حسگر در بازه دمایی صفر الی صد درجه سانتی‌گراد بدست آمده است. حسگر دو حالته طراحی شده، امکان افزایش تفکیک‌پذیری و دقت اندازه‌گیری را در دمای اتاق و کاهش خطای اندازه‌گیری در دماهای غیر دمای اتاق را می‌دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۸-۰۵-۱۳۹۷
بازنگری: ۲۰-۰۹-۱۳۹۷
پذیرش: ۰۶-۱۰-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۰۸-۱۱-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
حسگر نیروی دو حالته کوارتز
اثر نیرو-فرکانس
خطای دمایی
حساسیت
مدل‌سازی پاسخ

۱-مقدمه

کریستال‌های کوارتز از جمله مواد پیزوالکتریک هستند که در ساخت حسگرهای دقیق کاربردهای زیادی دارند [۱]. این کریستال‌ها با توجه به جهات برش وجوهشان نسبت به جهات کریستالوگرافی اصلی تک سلول کوارتز، نام‌گذاری می‌شوند. کریستال با برش آ-تی[1] یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین کریستال‌های کوارتز است که در ساخت حسگرها و تشدیدگرهای الکتریکی کاربرد دارد. علت این امر به حساسیت کم‌فرکانس تشدید نوسان این کریستال به دما باز می‌گردد. کریستال‌های کوارتز دارای مدول الاستیسیته ثابتی هستند و همین امر باعث حداقل بودن عیب پسماند در حسگرهای کواتزی می‌شود. از طرفی فرکانس طبیعی ارتعاش کریستال‌های کوارتز به تنش‌های مکانیکی اعمال شده بر آن وابسته است [۲]. در سال ۱۹۶۵ راتاجسکی [۲] پدیده نیرو-فرکانس را در کریستال‌های کوارتزی مشاهده و کمی‌سازی کرد. بر این اساس فرکانس تشدید کریستال‌های پیزوالکتریک کوارتزی با اعمال نیرو به لبه‌های تشدیدگر تغییر می‌کند. راتاجسکی ضریبی را به نام ضریب نیرو-فرکانس برای کریستال‌های کوارتزی تعریف کرد و این ضریب را برای کریستال آ-تی بدست آورد. در سال ۱۹۶۹ هاموند و بنجامینسان [۳] با استفاده از کریستال‌های کوارتز یک مبدل فشار بر اساس اثر نیرو-فرکانس ساختند. در سال‌های بعد دانشمندان نیروسنج‌های دیجیتالی کوارتزی چنگال شکل[2] را معرفی نمودند [۴-۶]. بزرگ‌ترین ضعف این حسگرها عدم امکان بهره‌برداری از آن‌ها در محیط‌های آشفته، مناسب نبودن آن‌ها برای اندازه‌گیری نیروهای فشاری و دامنه محدود عملکردی آن‌ها بود [۷]. از دیگر ساختارهای معرفی شده برای حسگرهای نیروی کوارتزی، سنسورهای با دیسک مرتعش و بدنه تمام کوارتزی بود که این حسگرها دارای پیچیدگی‌های زیادی از نظر ساخت و قیمتی بالا بودند. جهت رفع این مشکل برخی محققان

1 AT-Cut

2 Tuning Fork

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dr.mohammadi@znu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

مانند کربت [۸] و دالمت و همکاران [۹] حسگرهای کوارتزی مونتاژ شده را معرفی کردند. در این حسگرها دیسک مرتعش از جنس کوارتز و سایر اجزای حسگر از جنس غیرکوارتزی بود. مشکل این حسگرها پیچیدگی ساختاری آن‌ها و تکرارپذیری کم خروجی این حسگرها بود [۱۰]. در سال ۲۰۰۱، وانگ و همکاران [۱۰] حسگر جدیدی بر اساس اصل نیرو-فرکانس طراحی کردند. حسگر معرفی شده به علت طراحی خاص پایه‌های انتقال نیرو به دیسک مرتعش، نسبت به خطای خروج از مرکز در نیروی ورودی حساسیت کمی داشت. این محققان زاویه اعمال نیرو را نسبت به زوایای کرسیتالوگرافی دیسک مرتعش به نحوی انتخاب کردند که حسگر نسبت به تغییرات دما حساسیت کمی داشت ولی از حساسیت حسگر کاسته می‌شد. از طرفی ساختار المان‌های انتقال‌دهنده به نحوی بود که قرار دادن و مونتاژ کردن دیسک مرتعش در آن حالت مشکل می‌شد. وانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۳، ساختار ساده‌تری را معرفی کردند که از دیسک‌های کوارتزی دایره‌ای به عنوان دیسک تشدیدگر استفاده شده بود. لبه دیسک کوارتزی برای افزایش دامنه اندازه‌گیری و کاهش تمرکز تنش نیرو، تخت در نظر گرفته شده بود. برای جبران اثر دما، حسگر را در دو مود ارتعاشی فعال کرده و با توجه به تفاوت حساسیت دمایی فرکانس طبیعی در این دو مود، با استفاده از مدار جبران‌ساز، اثر دما بر نیرو جبران‌سازی می‌شد. در سال ۲۰۰۸، آساکورا و همکاران [۱۲] حسگر نیروی جدیدی را بر اساس تکنولوژی میکروفاب، معرفی کردند که ابعاد آن نسبت به حسگرهای قبلی کوچک‌تر بوده و نیروی فشاری ۴۵ نیوتون را اندازه‌گیری می‌کرد. در سال ۲۰۱۵ موریزاکی و آرائی [۱۳] توانستند یک نیروسنج کوارتزی را با استفاده از تکنولوژی ساخت در ابعاد ریز[1] توسعه دهند. این نیروسنج به علت حساسیت بالا می‌توانست سیگنال‌های زیستی مانند ضربان قلب و تنفس را اندازه‌گیری کرده و تشخیص دهد. زوایای برش کریستال مورد استفاده در این نیروسنج به نحوی انتخاب شده بود که تغییرات دما اثری خطی بر حساسیت نیروسنج داشت و با مدار الکترونیکی قابل جبران‌سازی بود. در سال ۲۰۱۷ موریزاکی و همکاران [۱۴] توانستند یک حسگر نیرو با بدنه تمام کوارتزی و دیسک داخلی مستطیلی شکل از جنس کوارتز آ-تی در ابعاد کوچک بسازند. این حسگر با وجود ابعاد کوچکش قادر بود نیروهای وارده را در دامنه صفر الی ۶۰۰ نیوتون اندازه‌گیری کند.

1 Micro-Fabrication Technology

آن‌ها برای جبران خطای دمایی حسگر، از یک سنسور دما استفاده کرده و اثرات دمایی را با استفاده از مدار الکترونیکی جبران کردند. در همین سال، فام و همکاران [۱۵] یک سنسور فشار کوراتزی با بدنه فولاد ضد زنگ طراحی کردند که در این حسگر نیز تغییرات ضریب حساسیت نسبت به تغییرات دما به صورت خطی بود. بدین ترتیب جبران‌سازی خطای دمایی حسگر با سهولت بیشتری صورت می‌گرفت. در سال ۲۰۱۸ چن و همکاران [۱۶] توانستند با تغییر شکل و چیدمان الکترودهای نوسانگر کوارتزی، خطای ناشی از تغییر دما را در نیروسنج کوارتزی کاهش دهند.

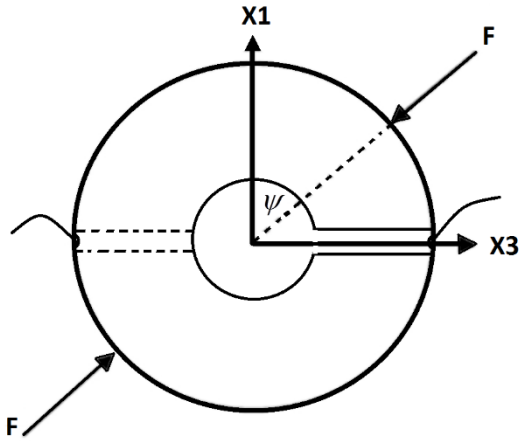
مطالعه تحقیقات قبلی نشان می‌دهد دستیابی به حساسیت بالا و کاهش اثرات دما بر عملکرد حسگر، از اهمیت بالایی برای محققان برخوردار بوده است و محققان از روش‌های گوناگونی برای جبران‌سازی اثر دما استفاده کرده‌اند. در برخی از این روش‌ها با تغییرات طرح نوسانگر کوارتزی سعی شده است ضریب حساسیت حسگر وابسته به دما نباشد. در برخی دیگر از تحقیقات نیز دما را در حین اندازه‌گیری نیرو اندازه‌گیری کرده‌اند و اثرات دمایی را توسط مدار الکترونیکی جبران‌سازی نموده‌اند. در این مقاله حسگر جدیدی از نوع حسگرهای کوارتزی طراحی و شبیه‌سازی شده است. این حسگر دارای قابلیت اندازه‌گیری نیرو در یک جهت و در دو حالت عملیاتی است. در حالت اول حساسیت حسگر بالا و در حالت دوم خطای دمایی حسگر پایین است. بدین ترتیب با توجه به نیاز کاربر، حسگر را می‌توان در دو مود عملیاتی به کار گرفت و با توجه به در دست بودن ضریب حساسیت در هر مود، تغییرات فرکانس را به نیرو تبدیل کرد. با توجه به این‌که طرح حسگر نسبت به حسگرهای متداول متفاوت است، نیاز به مدل‌سازی خروجی حسگر وجود دارد. این مدل‌سازی با ترکیب روش المان محدود و مدل ریاضی که در تحقیقات قبلی مولفین بدست آمده است [۱۷]، صورت می‌گیرد. در ادامه با توجه به نتایج مدل‌سازی، اثر برخی پارامترهای طراحی حسگر بر خروجی حسگر بررسی می‌گردد.

در مجموع نوآوری‌های پژوهش حاضر به شرح زیر است:

۱-ارائه طرحی جدید برای حسگرهای نیروی کوارتزی با قابلیت کاربرد در دو حالت کاری

۲-تحلیل رفتار نیرو-فرکانس برای کریستال‌های دو پخه با توجه به تغییرات تنش‌های اولیه.

۳-تحلیل خطای دمایی حسگر و تغییرات خطای دمایی با توجه به زوایای اعمال نیرو



شکل ۱: وارد شدن نیروی شعاعی به کریستال کوارتز

Fig. 1: Insertion of radial forces to the quartz crystal

ایده استفاده از حسگر کوارتزی در دو حالت کاری می‌تواند به عنوان الگویی جهت ساخت سنسورهای دوحالته با سایر مواد پیزو الکتریک مانند کریستال‌های لانگاسیت[1] و لیتیوم نیوبات[2] در نظر گرفته شود.

۲-اثر نیرو-فرکانس در کریستال‌های کوارتزی با برش آ-تی

نوسانگر کوارتزی هسته اصلی حسگرهای نیروی کوارتزی است. این نوسانگرها به واسطه اثر معکوس پیزوالکتریسیته با اعمال ولتاژ متناوب تحت ارتعاش قرار می‌گیرند. بیشتر نوسانگرهای کوارتزی در مود ارتعاشی ضخامتی-برشی فعال هستند. کنش‌های خارجی پایدار و غیرپایدار در مرزهای نوسانگر، با به وجود آمدن تنش‌ها و کرنش‌های داخلی در نوسانگر، به تعادل و حالت خنثی مکانیکی در می‌آیند. این کنش‌های خارجی شامل انواع بارهای حرارتی و مکانیکی، تنش‌های سطحی و نیروهای حجمی هستند. ایجاد کرنش‌ها و تنش‌ها در داخل نوسانگر باعث تغییر فرکانس طبیعی نوسانگر خواهد شد. علت این امر تغییرات شکل هندسی و ضخامت، تغییر چگالی، تغییر ثابت‌های مکانیکی و الکتریکی و موثر شدن ثابت‌های درجه سوم الاستیسیته در کوارتز است [۸]. نمونه‌ای از این پدیده، در حسگرهای نیروی کوارتزی رخ می‌دهد. در این حسگرها بر اثر اعمال نیرو به لبه دیسک نوسانگر، فرکانس طبیعی ارتعاشات ضخامتی-برشی نوسانگر دچار تغییر شده و این تغییر توسط مدار الکتریکی، اندازه‌گیری می‌شود. به این پدیده اصطلاحا اثر نیرو-فرکانس گفته می‌شود. این اثر به کمک آزمایش نیرو-فرکانس برای انواع کریستال‌های کوارتز اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است، کریستال کوارتز تحت یک زوج نیروی شعاعی با زوایای مشخصی نسبت به زوایای دیسک نوسانگر قرار می‌گیرد و تغییر فرکانس آن اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۱، نیرو با زاویه تمایل ψ نسبت به محور اصلی x_3 به لبه دیسک وارد می‌شود. ولتاژ متناوب توسط یک اسیلاتور و به واسطه الکترودهای نشانده شده در دو سمت دیسک، اعمال می‌شود و دیسک در مود ضخامتی-برشی نوسان می‌نماید.

فرکانس طبیعی نوسان دیسک بر اثر اعمال نیرو بر لبه‌های دیسک متناسب با ضریب نیرو-فرکانس K به صورت خطی تغییر می‌کند. ضریب نیرو-فرکانس به کمک رابطه (۱) بدست می‌آید [۲].

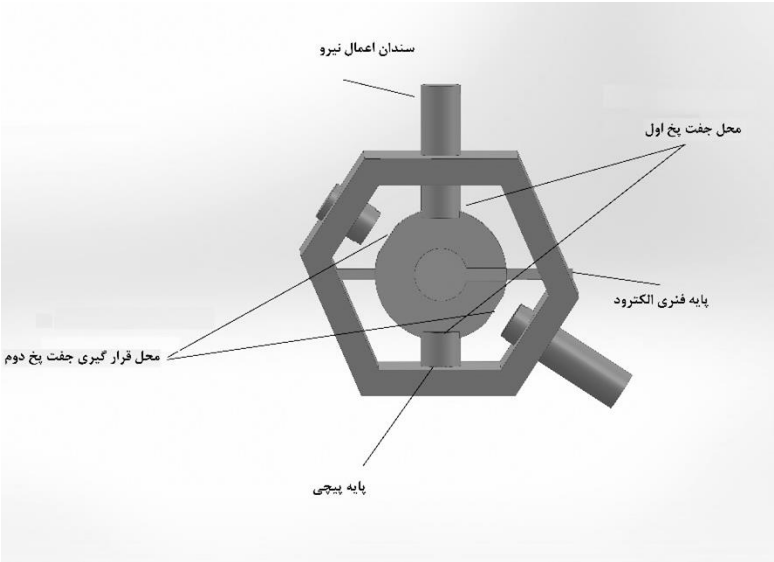
$$K = \frac{\Delta f}{f_0^{\,2}} \frac{nD}{F} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) متغیرهای F، f_0، n و D به ترتیب نیروی اعمال شده بر حسب نیوتون، فرکانس اولیه دیسک مرتعش قبل از اعمال نیرو، شماره هارمونیک موج ضخامتی برشی، و قطر دیسک است. مقدار ضریب نیرو-فرکانس به نوع برش کریستال کوارتز و نیز به زاویه تمایل اعمالی نیرو وابسته است. از طرفی این ضریب به تغییرات دمای دیسک نیز حساس است. واحد ضریب نیرو-فرکانس، متر ثانیه بر نیوتون (m.s/N) است.

رابطه (۱) توسط راتاجسکی [۲] معرفی شد و مقدار ضریب نیرو-فرکانس برای کریستال آ-تی دایروی در زوایای تمایل مختلف به صورت تجربی بدست آمد. از طرفی داولتر [۱۸] وابستگی ضریب نیرو-فرکانس به دما را در زوایای تمایل مختلف به صورت تجربی نشان داد و منحنی ضریب نیرو-فرکانس را در دمای ۷۸ درجه سانتی‌گراد به صورت تجربی بدست آورد.

اعمال نیرو به دیسک در حالت کاملا دایروی مشکل است. به همین دلیل در طراحی نیروسنج‌های کوارتزی، لبه دیسک کوارتزی تخت می‌شود. ایجاد لبه‌های تخت به علت تغییر توزیع تنش، باعث تغییر زوایای بهینه ذکر شده خواهد شد. اگرچه زوایای جدید به زوایای مطلوب در دیسک کاملا دایروی نزدیک خواهند بود. در این مقاله برای تعیین زوایای دقیق مورد نظر از تحلیل المان محدود و مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌شود.

1 -Langasite (LGS)
2 - Lithium Niobate



شکل ۲: طرح شماتیک حسگر دو حالته کوارتزی

Fig. 2: Schematic model of the dual state quartz sensor

۳-طراحی نیروسنج دو حالته

در شکل ۲ طرح شماتیک حسگر دو حالته کوارتزی نشان داده شده است. دیسک نوسانگر کوارتزی دارای دو جفت لبه (پخ) اعمال نیروی روبروی هم است. زوایای محور عمود بر لبه ها نسبت به محور x_lرا زاویه تمایل اعمال نیرو می‌نامیم. این زوایا به نحوی انتخاب می‌شوند که برای مود اول کاری، حساسیت حسگر به نیروی اعمالی بیشینه باشد. در این مود کاری ضریب نیرو-فرکانس بیشینه خواهد بود. جفت پخ اول که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند مربوط به مود حساسیت بیشینه حسگر است. در مود دوم کاری، خطای دمایی حسگر کمینه است. یعنی تغییرات ضریب نیرو-فرکانس نسبت به تغییر دما کمینه می‌باشد. در این مود، حساسیت حسگر نیز نسبت به مود قبل کمتر می‌باشد. جفت پخ دوم در شکل ۲ مربوط به این مود هستند.

پایه‌های فلزی متصل به الکترودهای حسگر، نقش نگه‌دارنده دیسک در فضا را ایفا می‌کند. ابتدا پیچ تنظیم تا ارتفاع از پیش تعیین شده حرکت می‌کند تا به پخ زیرین دیسک کوارتزی اتصال یابد. سر پیچ زیرین داری شیاری است که لبه دیسک در آن شیار قرار می‌گیرد. کف شیار به لبه پایینی دیسک اتصال می‌یابد و دیسک از اطراف نسبت به شیار لقی مناسب دارد. سپس پین بالایی بر روی پخ مقابل قرار خواهد گرفت و نیروی فشاری از طریق پین بالایی اعمال خواهد شد. در صورت نیاز به تغییر حالت، پیچ تنظیم و پین بالایی از دیسک جدا شده و نیرو از طریق مکانیزم مشابه در زاویه دیگر اعمال می‌گردد. بنابراین در هر مود کاری نیرو تنها به یک جفت پخ اعمال می‌شود.

به کارگیری این حسگر به کاربر صنعتی امکان خواهد داد تا در محیط‌های اندازه‌گیری که تغییرات دما ناچیز است، اندازه‌گیری را در مود اول کاری حسگر انجام دهد. بدین ترتیب حساسیت حسگر بیشینه است و تفکیک‌پذیری[1] اندازه‌گیری نیز افزایش می‌یابد و اندازه‌گیری مقادیر کمتری از نیرو ممکن می‌شود. از طرفی اگر تغییرات دما در محیط زیاد باشد، می‌توان اندازه‌گیری را در مود دوم انجام داد. در این مود اثر دما بر حساسیت حسگر کمتر است و صحت[2] اندازه‌گیری بیشتر می‌باشد.

با توجه به اینکه هندسه دیسک، طول پخ و زاویه اعمال نیرو در حساسیت فرکانسی حسگر اثرگذار است، در قسمت بعد اثر این عوامل بر حساسیت حسگر، شبیه‌سازی شده و زوایای مناسب اعمال نیرو معرفی می‌گردند.

۴-مدل‌سازی پدیده نیرو-فرکانس در کریستال دایروی کوارتزی

اعمال نیرو و تغییرات دما در کریستال کوارتز موجب به وجود آمدن کرنش‌های آغازین شده و این کرنش‌ها باعث تغییر فرکانس طبیعی کوارتز خواهد شد. تاکنون محققین مدل‌های گوناگونی برای پیش‌بینی مقدار تغییر فرکانس کریستال کوارتز بر اساس کرنش‌های آغازین به وجود آمده در آن، معرفی نموده‌اند. یکی از مهم‌ترین این

1 Resolution
2 Accuracy

مدل‌ها توسط لی و همکاران [۱۹] ارائه شد که در این مدل از تئوری ورق میندلین برای محاسبه تغییرات فرکانس استفاده شده بود. این مدل توسط وانگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۱ تکمیل شد و رابطه تغییر فرکانس در کریستال کوارتز به شکل دلخواه ارائه شد. محمدی و همکاران [۱۷] نشان دادند اثر ضرایب پیزوالکتریسیته در تغییر فرکانس بسیار ناچیز است و می‌توان از جملات مربوط به ضرایب پیزوالکتریک برای تسهیل مدل عددی چشم‌پوشی کرد. بدین ترتیب برای محاسبه تغییر فرکانس کریستال کوارتز کافی است کرنش‌های اولیه ایجاد شده در دیسک کوارتزی محاسبه شود. آن‌ها مدلی برای پیش‌بینی تغییرات فرکانس کریستال کوارتز بر اثر اعمال همزمان کرنش‌های مکانیکی در دماهای مختلف ارائه دادند [۲۰]

۱-۴- مدل ریاضی پدیده نیرو-فرکانس برای کریستال آ-تی در دمای دلخواه

بر این اساس، تغییرات فرکانس در کریستال کوارتز که در دمای θ قرار دارد و تحت بار مکانیکی در راستای شعاعی قرار می‌گیرد، با رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = (U_{1,1}{}^{(0)})_m + \frac{1}{2C_{66}^{\theta}} C_{661}^{\theta}(E_1^{(0)})_m + C_{662}^{\theta}(E_2^{(0)})_m + C_{663}^{\theta}(E_3^{(0)})_m + C_{664}^{\theta}(E_4^{(0)})_m \quad (۲)$$

در این رابطه $(\Delta f / f_0)$ تغییر فرکانس نسبت به فرکانس اولیه f_0 در دمای θ، C_{66}^{θ}ضریب سفتی مرتبه دو در دمای کریستال، C_{661}^{θ} ضرایب سفتی مرتبه سه در آن دما، $(E_i^0)_m$ کرنش‌های مکانیکی مرتبه صفر میندلین بر اثر اعمال بار های مکانیکی و $(U_{1,1}{}^{(0)})_m$ گرادیان جابجایی مرتبه صفر میندلین بر اثر اعمال بار مکانیکی است. در رابطه (۲) از سیستم اندیس‌گذاری وویت[1] استفاده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، ضرایب مرتبه سه سفتی که منشاء رفتار غیرخطی کریستال می‌باشند، در میزان تغییرات فرکانس موثرند و به همین علت پدیده نیرو-فرکانس یک پدیده غیرخطی است. با جایگذاری مقدار تغییر فرکانس نسبت به فرکانس اولیه یعنی $\Delta f / f_0$، در رابطه (۱)، می‌توان ضریب نیرو-فرکانس را در دمای دلخواه θ محاسبه کرد.

1 Voigt Notation System

برای محاسبه تغییر فرکانس در رابطه (۲)، باید مولفه‌های کرنش مرتبه صفر میندلین تعیین شوند. این مولفه‌های کرنش با استفاده از رابطه (۳) که توسط میندلین به کار رفت، تعریف می‌شوند [۲۱]. بر این اساس داریم:

$$E_{ij} = \sum_n x_2^{\,n} \left(E_{ij}^{(n)}\right) \quad (۳)$$

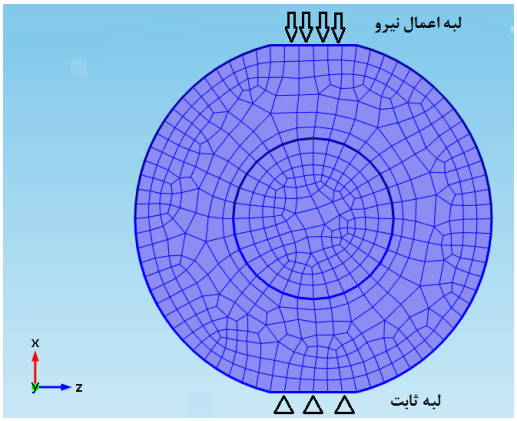
در این رابطه مقدار کرنش واقعی به صورت بسط سری حول محور ضخامت x_2 نوسانگر تعریف می‌شود. $E_{ij}^{(n)}$ها مولفه‌های درجه nام کرنش هستند. با توجه به نازک بودن دیسک کوارتزی و اعمال نیروهای کوچک اولیه در آزمون نیرو-فرکانس، می‌توان از جملات درجه بالاتر از صفر در رابطه (۳) صرف‌نظر نمود و مقادیر کرنش مرتبه صفر را با مقادیر کرنش واقعی برابر فرض کرد [۲۱]. بنابراین با محاسبه مقدار کرنش واقعی به کمک رابطه (۴) می‌توان کرنش‌های درجه صفر را در سیستم اندیس‌گذاری وویت به صورت زیر حساب کرد[۱۷].

$$\begin{aligned} E_1^{(0)} &= S_{11}^{(\theta)}T_1 + S_{13}^{(\theta)}T_3 + S_{15}^{(\theta)}T_5, \\ E_2^{(0)} &= S_{21}^{(\theta)}T_1 + S_{23}^{(\theta)}T_3 + S_{25}^{(\theta)}T_5, \\ E_3^{(0)} &= S_{31}^{(\theta)}T_1 + S_{33}^{(\theta)}T_3 + S_{35}^{(\theta)}T_5, \\ E_4^{(0)} &= S_{41}^{(\theta)}T_1 + S_{43}^{(\theta)}T_3 + S_{45}^{(\theta)}T_5. \end{aligned} \quad (۴)$$

در این روابط $S_{ij}{}^{(\theta)}$ کامپلیاس کوارتز در دمای مورد نظر و T_iها تنش‌ها در سیستم اندیس‌گذاری وویت می‌باشند. بدین ترتیب برای محاسبه کرنش‌های مرتبه صفر میندلین کافی است تنش‌های ایجاد شده در دیسک دایروی کوارتزی را با استفاده از تحلیل ریاضی یا تحلیل المان محدود استخراج نمود. در این پژوهش از تحلیل عددی برای محاسبه تنش‌های اولیه استفاده شده است. در این تحلیل، کوارتز به صورت یک ماده غیرهمسانگرد در نظر گرفته شده است و ضرایب الاستیسیته آن به دما وابسته است.

۲-۴- تحلیل المان محدود تنش‌های آغازین:

هدف از این تحلیل بدست آوردن تنش‌های T_1، T_3 و T_5 در



شکل ۳: المان‌بندی و بارگذاری دیسک کوارتزی تک پخ

Fig. 3: Meshing and loading of the quartz disc with one pair of flat edges

دمای θ در ناحیه زیر الکترود دیسک کوارتزی است. برای این کار از نرم افزار المان محدود کامسول[1] استفاده شده است. در این تحلیل فرض می‌شود که نوسانگر کوارتزی قبل از بارگذاری مکانیکی با محیط هم دما شده است. بنابراین تنها تنش‌های حاصله از بارگذاری مکانیکی در دمای θ در تغییر فرکانس نوسانگر موثر است. تحلیل عددی با توجه به ناهمسانگرد بودن کوارتز به صورت سه‌بعدی صورت گرفت. برای بدست آوردن مولفه‌های تنش مکانیکی، ضرایب سفتی درجه دو نوسانگر به صورت تابعی از دما ذیل رابطه (۵) به نرم افزار کامسول معرفی گشت.

$$C_{ijkl}^{\theta} = C_{ijkl}^{25^{o}C} + \tilde{C}_{ijkl}^{(1)}(\theta - 25^{o}C) + \frac{1}{2}\tilde{C}_{ijkl}^{(2)}(\theta - 25^{o}C)^2 + \frac{1}{6}\tilde{C}_{ijkl}^{(3)}(\theta - 25^{o}C)^3 \quad (۵)$$

که در این رابطه $\tilde{C}_{ijkl}^{(1)}$، $\tilde{C}_{ijkl}^{(2)}$ و $\tilde{C}_{ijkl}^{(3)}$ به ترتیب مشتقات دمایی مرتبه اول، دوم و سوم ضرایب سفتی درجه دو کوارتز می باشند [۲۲].

بدین ترتیب تنش‌های آغازین در دمای θ بر اساس روابط سازنده (۶) در نرم‌افزار کامسول مورد ارزیابی قرار گرفت.

1 COMSOL

$$\begin{aligned} E_{ij} &= \frac{1}{2}\left(U_{j,i} + U_{i,j}\right), \\ T_{ij} &= C_{ijkl}^{\theta} E_{kl} \\ T_{ij,j} &= 0 \qquad in \quad V \\ P_i &= N_j T_{ij} \qquad on \quad S \end{aligned} \quad (۶)$$

در این روابط V، S، P_i و N_j به ترتیب حجم، سطح، کشش سطحی[2]، و بردار نرمال سطح می‌باشند. مولفه‌های کرنش E_{kl} در معادلات (۶) کرنش‌های حاصل از اعمال نیروهای مکانیکی در دمای ثابت θ هستند.

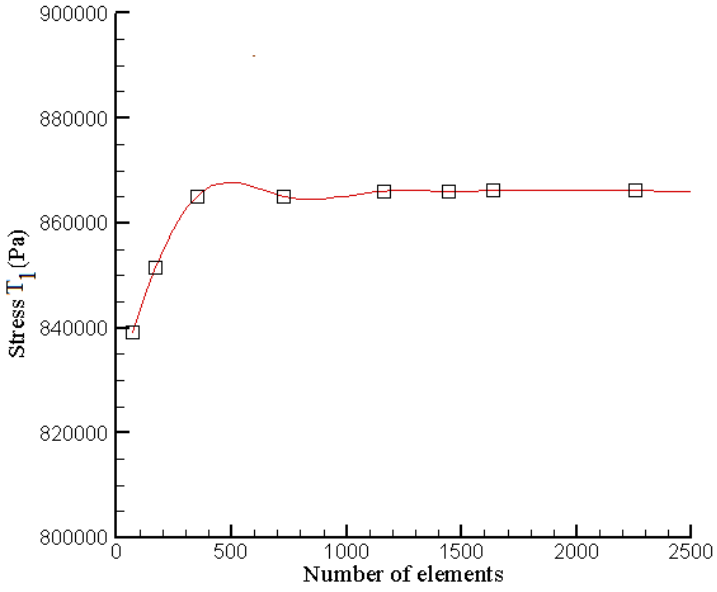
۳-۴- صحت‌سنجی مدل عددی-ریاضی پدیده نیرو-فرکانس

با توجه به اینکه در مطالعات تجربی انجام شده، دیسک کوارتزی دارای یک جفت پخ است، برای ارزیابی مدل در مسئله پیش رو همین حالت مد نظر قرار گرفت، از طرفی قطر و ضخامت دیسک برابر با دیسک مورد استفاده در حسگر دو موده در نظر گرفته شد. بدین ترتیب مقادیر ۱۰ میلی‌متر و ۰/۱۶۶۴ میلی‌متر برای قطر و ضخامت دیسک به کار رفت. کریستال آ-تی برای ضخامت ۰/۱۶۶۴ میلی‌متر دارای فرکانس پایه ضخامتی-برشی ۱۰ مگاهرتز است [۱۹].

شرایط مرزی دیسک در حالتی که یک جفت لبه برای اعمال نیرو وجود دارد، در شکل ۳ نشان داده شده است. شرایط مرزی در نرم‌افزار به گونه‌ای اتخاذ شده است که به یکی از لبه‌های دیسک نیروی فشاری یکنواخت اعمال می‌شود. این لبه در جهت عمود بر نیرو به عبارت دیگر جهت z در شکل ۳ و همچنین در جهت عمود بر دیسک یعنی جهت y در شکل ۳ حرکتی ندارد. لبه روبرویی نیز در تمام جهات مقید است و ثابت فرض می‌شود. این شرایط مرزی با توجه به شرایط عملی آزمایش نیرو-فرکانس انتخاب شده است. لازم به ذکر است که جهت x_1 در مدل ریاضی (شکل ۱) معادل جهت x در شبیه‌سازی، جهت x_2 معادل جهت y و جهت x_3 معادل جهت z است.

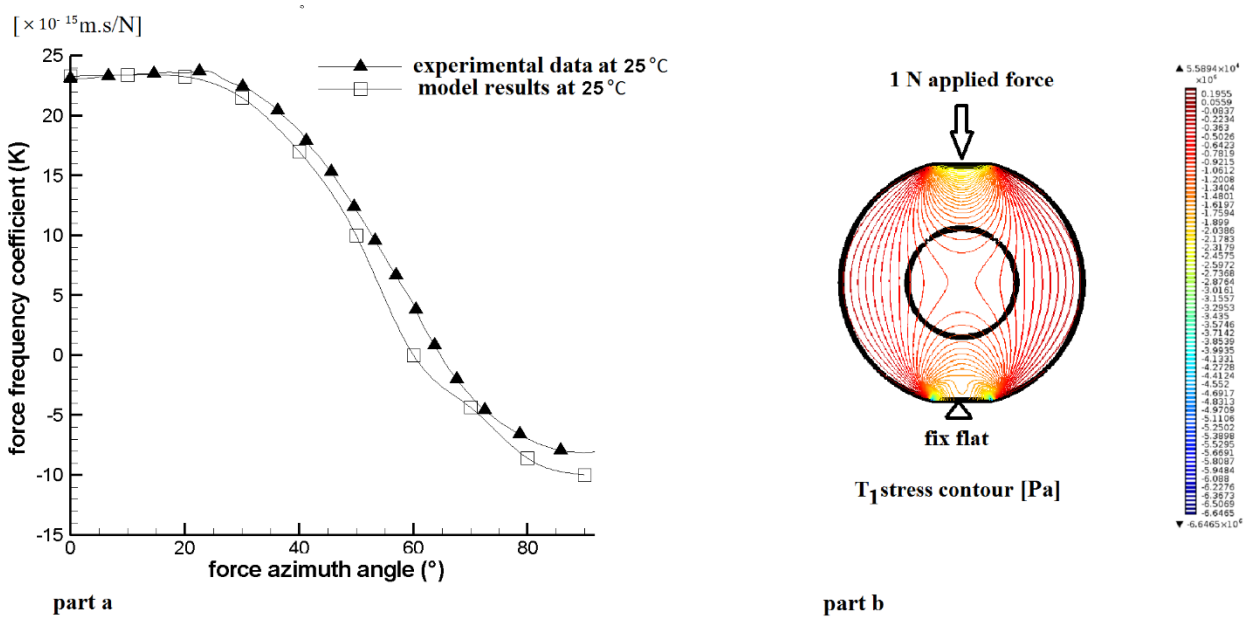
در مرحله بارگذاری، مقدار نیروی اعمال شده یک نیوتون در نظر گرفته شد و تنش‌های T_1، T_3 و T_5 ایجاد شده در دیسک تک پخ (شکل ۳) در زوایای تمایل مختلف بدست آمد. مولفه‌های تنش T_1، T_3 و T_5 به ترتیب معادل تنش‌های T_{xx} ، T_{zz} و T_{zx} در سیستم

2 -Surface Traction



شکل ۴: تحلیل وابستگی نتایج به ابعاد المان

Fig. 4: Mesh dependency analysis

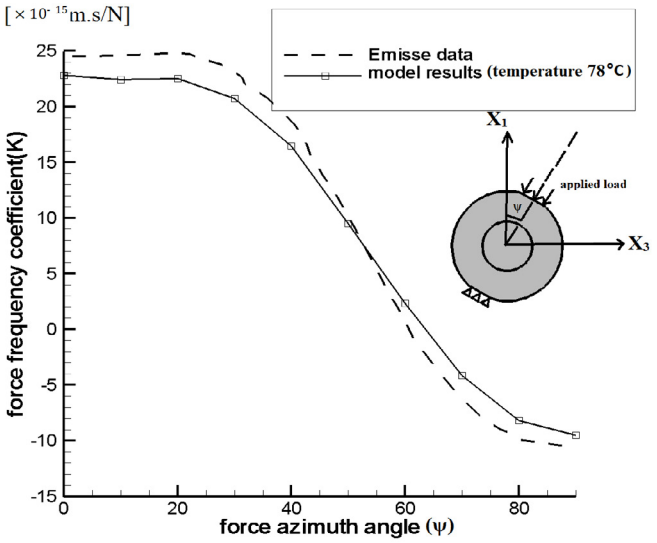


شکل ۵: (الف): منحنی تجربی نیرو-فرکانس [۲۳] در دمای ۲۵، (ب)- کانتور تنش‌های T_1 ایجاد شده در نوسانگر.

Fig.5: Part a: experimental force frequency curve [23] at 25°C, part b: T_1 stress contours

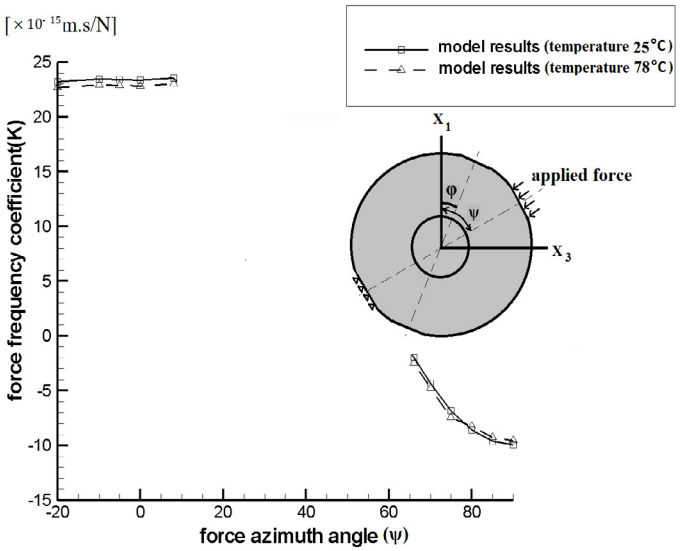
اندیس‌گذاری معمولی در نرم‌افزار المان محدود می‌باشند. زوایای تمایل در بازه صفر الی ۹۰ درجه با گام ۱۰ درجه تغییر می‌کردند. در این تحلیل از المان‌هایی با مقطع چهارضلعی برای تحلیل استفاده شده است. با توجه به تاثیرات ابعاد المان بر نتایج روش المان محدود، تحلیل وابستگی مش برای مدل عددی به کار رفته در این تحقیق، صورت پذیرفت. در این تحلیل تاثیرکوچک‌سازی المان بر تنش‌های آغازین در مرکز دیسک مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه تحلیل برای تنش T_1 در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با افزایش تعداد المان‌ها از مقدار ۱۵۰۰ عدد، تغییرات اندک و قابل چشم‌پوشی در تنش آغازین رخ می‌دهد. در این تحقیق حداقل تعداد المان برابر با ۱۶۳۴ در نظر گرفته شده است.

با بدست آمدن تنش‌های T_1، T_3 و T_5 و قرار دادن این مقادیر در روابط (۴)، مولفه‌های کرنش آغازین مرتبه صفر میندلین محاسبه



شکل ۶: منحنی نیرو-فرکانس حاصل از شبیه‌سازی در دمای ۷۸ درجه در مقایسه با منحنی تجربی[۲۳]

Fig. 6: The force frequency curve based on simulations at 78°C comparing with the experimental curve [23]



شکل ۷: تغییرات ضریب نیرو-فرکانس در حالت اول کاری حسگر در دمای ۲۵ و ۷۸ درجه

Fig. 7: Variation of force frequency coefficients at first working state of the sensor at 25°C and 78°C

شدند. سپس این مولفه‌های کرنش در رابطه (۲) قرار داده شدند و مقدار نسبت تغییر فرکانس کریستال نسبت به فرکانس اولیه (یعنی $\frac{\Delta f}{f_0}$) بدست آمد و در رابطه (۱) قرار داده شد تا ضرایب نیرو-فرکانس در زوایای تمایل ذکر شده محاسبه شوند. ضرایب نیرو-فرکانس برای کوارتز آ-تی در دمای ۲۵ درجه به ترتیبی که در بالا ذکر شد، محاسبه شد. مقایسه نمودار نیرو-فرکانس حاصل از مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی [۲۳] در شکل ۵ (الف) و هم‌چنین کانتور تنش‌های اولیه T_1 در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است.

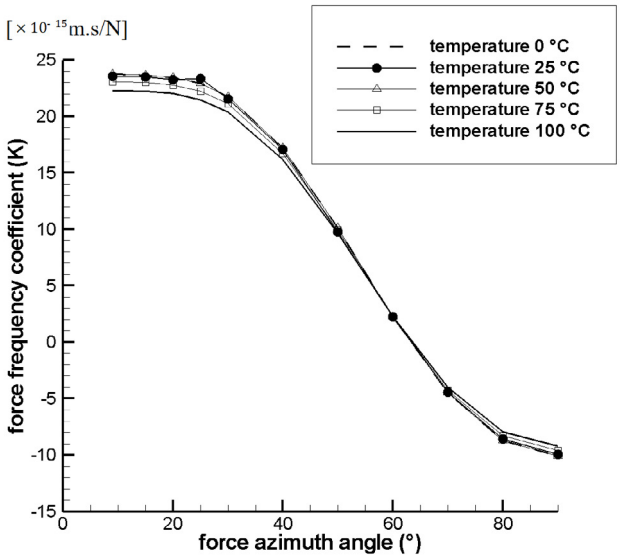
همان‌طورکه در نمودارهای نیرو-فرکانس در شکل ۵ (الف) مشاهده می‌شود، بیشترین خطا میان نتایج نمودار تجربی و نتایج مدل‌سازی، در زاویه تمایل ۶۰ درجه رخ می‌دهد و در حدود ۳×۱۰^{-۱۵}(m.s/N) است که مقداری ناچیز می‌باشد. علت بروز خطا می‌تواند چشم‌پوشی از جملات مرتبه بالاتر کرنش میندلین در مدل ریاضی باشد. در زاویه تمایل ۶۰ درجه، مقدار ضریب نیرو-فرکانس بر اساس مدل ریاضی نزدیک به صفر است. بنابراین در این زاویه تمایل، مولفه‌های غیرخطی کرنش میندلین که در مدل ریاضی چشم‌پوشی شده‌اند می‌توانند ضریب نیرو-فرکانس را تغییر دهند.

محاسبات ذکر شده در قسمت بالا برای دمای ۷۸ درجه نیز صورت پذیرفت. با توجه به این‌که خواص مکانیکی کوارتز همانند ضرایب سفتی درجه دو و ضریب انبساط حرارتی، وابسته به دما می‌باشند، با استفاده از مشتقات دمایی ضرایب مذکور برای کوارتز آ-تی، مقدار این ضرایب در دمای ۷۸ بدست آمد و در مدل عددی و ریاضی اعمال گشت. شکل ۶ منحنی نیرو-فرکانس در دمای ۷۸ درجه را در مقایسه با منحنی تجربی نشان می‌دهد.

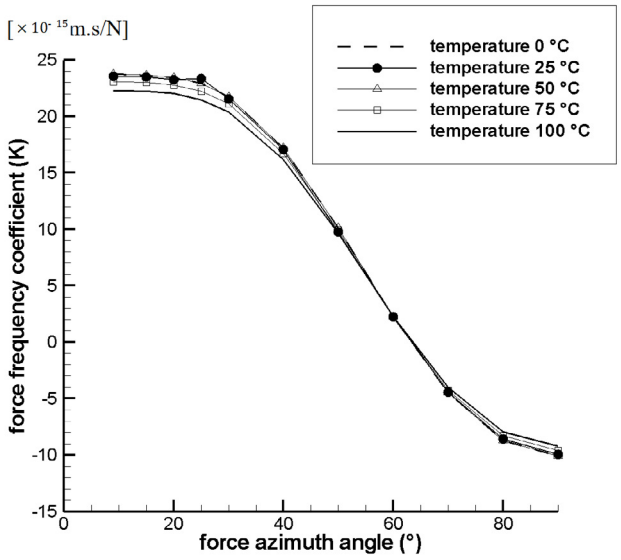
با مقایسه مقادیر عددی ضریب نیرو-فرکانس که در نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود، اختلاف ضرایب نیرو-فرکانس منحنی‌های تجربی و مدل‌سازی در زاویه ۲۰ درجه بیشینه بوده و برابر با $۲/۳\times۱۰^{-۱۵}$(m.s/N) است. این خطا در زاویه حدود ۵۰ درجه تقریبا به صفر نزدیک می‌شود و مجددا روند افزایشی پیدا می‌کند. در زاویه ۸۰ درجه مقدار خطا به $-۱/۶۹\times۱۰^{-۱۵}$(m.s/N) می‌رسد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مقادیر خطا بسیار ناچیزند. یکی از علت‌های اصلی بروز این خطا میان نتایج مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی، عدم وجود مشتقات دمایی ضرایب درجه سه سفتی است که در مرجع [۱۷] به آن اشاره شده است.

۵-شبیه‌سازی رفتاری حسگر نیروی دو حالته جهت تعیین زوایای مناسب اعمال نیرو

با توجه به این‌که توزیع تنش در نوسانگر وابسته به تعداد جفت پخ انتقال نیرو است، ضرایب نیرو-فرکانس و اثر دما بر منحنی نیرو-فرکانس را به‌طور جداگانه در حالت دو پخ محاسبه می‌نماییم. زوایای قرارگیری جفت پخ‌ها نسبت به هم به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تداخلی در پخ ها صورت نگیرد. در تحلیل‌های این قسمت، عرض پخ



شکل ۸: اثر دما بر منحنی‌های نیرو-فرکانس در حالت دوم کاری حسگر
Fig. 8: Effect of the temperature on force frequency curves at second working state of the sensor



شکل ۹: نمودار خطای ناشی از تغییرات دما بین ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد
Fig. 9: The temperature error of force frequency coefficients between 25°C and 100°C

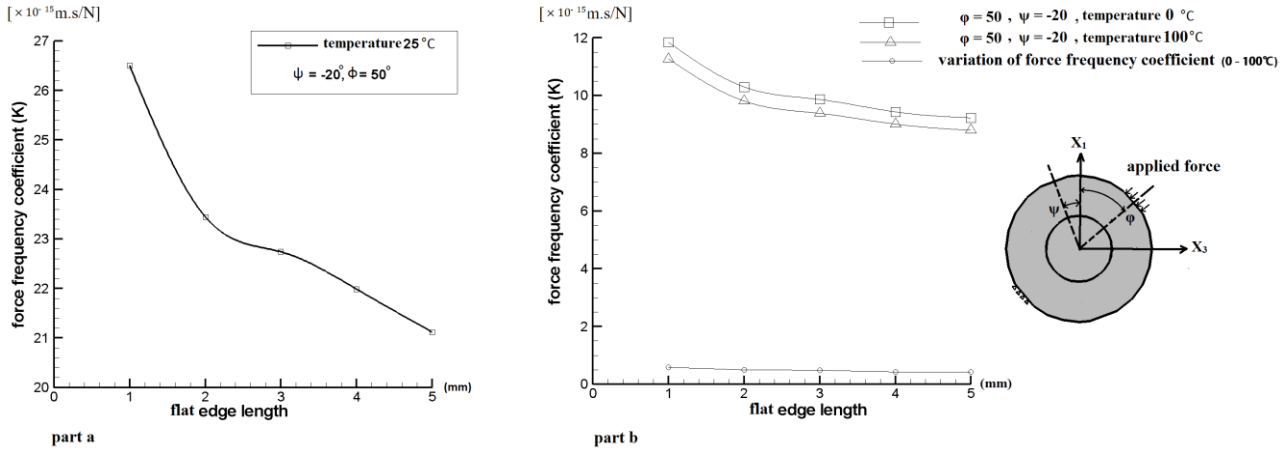
ها همانند قسمت قبل ۲/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. یکی از جفت پخ‌ها دارای زاویه تمایل ψ و دیگری دارای زاویه تمایل φ است. منظور از زاویه تمایل، زاویه مابین محور مرکزی عمود بر جفت پخ و محور اصلی x_1 می‌باشد. جفت پخ اول برای مود کاری اول حسگر یعنی حالت حساسیت بیشینه حسگر در نظر گرفته شده است. لذا زاویه تمایل ψ به نحوی تعیین می‌شود که حساسیت حسگر (یعنی تغییرات فرکانس حسگر نسبت به نیروی وارده) برای جفت پخ اول بیشینه باشد. جفت پخ دوم (با زاویه تمایل φ) برای حالت دوم کاری حسگر که دارای خطای دمایی کمی است در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه زوایای تمایل مناسب در دو مود کاری حسگر، دو آزمون شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. در آزمون اول، جفت پخ دوم را ثابت در نظر گرفته و جفت پخ اول (با زاویه تمایل ψ) در حول جفت پخ دوم چرخانده شد تا ضرایب نیرو-فرکانس برای این حالت بدست آید. این آنالیز برای بدست آوردن زوایای مناسب در حالت حساسیت بیشینه اثر نیرو-فرکانس انجام شد. نتایج آنالیز در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نمودار ضریب نیرو-فرکانس در نواحی که پخ‌ها با هم تداخلی نمی‌نمایند، رسم شده است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، ضریب نیرو-فرکانس در زاویه ۲۰- الی ۲۰ درجه تقریبا ثابت و بیشینه است. با این همه به منظور راحت‌سازی عملیات ساخت بهتر است جفت پخ‌ها از یکدیگر بیشترین فاصله را داشته باشند. به همین علت زاویه ۲۰- درجه برای پخ‌های حالت یک پیشنهاد می‌گردد. در این حالت با فرض طول لبه پخ ۲/۵ میلی‌متر و با توجه به دیگر ابعاد هندسی حسگر، ضریب نیرو-فرکانس که نمایانگر حساسیت حسگر است، ۲۳×۱۰^{-۱۵} m.s/N می‌باشد. مقدار خطای دمایی در این مود کاری در بخش بعد محاسبه می‌گردد.

در آزمون دوم، خطای دمایی ضریب نیرو-فرکانس به عنوان معیار طراحی در نظر گرفته شد. برای بدست آوردن زوایای مناسب پخ‌ها در حالت دوم، منحنی نیرو-فرکانس حسگر به ازای تغییرات زاویه جفت پخ دوم در حضور جفت پخ اول در دماهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. با کنار هم گذاشتن منحنی‌های نیرو-فرکانس در دماهای مختلف، بازه دمایی ثابت ماندن ضریب نیرو-فرکانس تعیین شد. در شکل ۸ منحنی‌های حاصله نشان داده شده است.

همانطورکه مشاهده می‌شود، منحنی‌های نیرو-فرکانس در دماهای مختلف در زوایای ۵۰ الی ۷۰ درجه بسیار به هم نزدیک می‌شوند. از طرفی حساسیت حسگر نیز کم می‌شود. بنابراین انتخاب زاویه تمایل مناسب در مود دوم کاری به حداقل حساسیت لازم برای حسگر و خطای دمایی مجاز وابسته است. این مقادیر توسط طراح و سازنده حسگر تعیین می‌شود. به عنوان مثال در زاویه ۶۰ درجه ضریب نیرو فرکانس به صفر نزدیک می‌شود، در عین حال خطای دمایی نیز کم است. بنابراین با نزدیک شدن به این زاویه، عملا حسگر به دما و نیرو واکنش محسوسی نمی‌دهد و انتخاب این زاویه برای



شکل ۱۰: اثر طول لبه بر ضریب نیرو فرکانس در حالت اول اعمال نیرو (الف) و حالت دوم اعمال نیرو (ب)

Fig. 10: The effect of flat length on force frequency coefficient at first state of loading (part a) and second state of loading (part b)

حسگر مطلوب نیست. به منظور تسهیل انتخاب زاویه، مقدار درصد خطای دمایی در فاصله ۱۰ الی ۹۰ درجه برای حسگر در دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سنجیده شد. برای محاسبه خطای نسبی از رابطه (۷) استفاده شده است.

$$Error(\varphi) = 100\frac{K_{\varphi}^{25^{o}C} - K_{\varphi}^{100^{o}C}}{K_{\varphi}^{25^{o}C}} \qquad (۷)$$

در این رابطه $K_{\varphi}^{100^{o}C}$ و $K_{\varphi}^{25^{o}C}$ ضرایب نیرو فرکانس در زاویه تمایل φ و در دماهای ۱۰۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. نمودار درصد خطا در شکل ۹ نشان داده شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان زاویه تمایل φ را بر مبنای درصد خطای دمایی مجاز و حساسیت حداقل مورد نظر انتخاب کرد. خطای دمایی در زاویه ۵۳ درجه نزدیک به صفر است. از طرفی حساسیت حسگر در ۲۵ درجه برای این زاویه برابر با $۷/۴۳\times۱۰^{-۱۵}$ m.s/N می‌باشد. همچنین درصد خطای دمایی در زاویه تمایل ۵۰ درجه ۱ درصد و ضریب نیرو فرکانس آن برابر با ۹×۱۰^{-۱۵} m.s/N یعنی در حدود ۳۹ درصد حالت حسگر در حساسیت بیشینه است که مقداری قابل قبول می‌تواند قلمداد شود.

۶-بررسی اثر طول پخ بر ضرایب حساسیت و خطای دمایی

با توجه به اینکه طول پخ‌های اعمال نیرو بر توزیع تنش‌های وارده بر کریستال موثر است، بررسی جداگانه‌ای بر اثرات عرض پخ در زوایای تمایل ۲۰- و ۵۰ درجه صورت گرفت. این زوایا بر اساس نتایج قسمت قبل انتخاب شدند. در این تحلیل نیروی اعمالی یک نیوتون در نظر گرفته شد و طول پخ‌ها از یک میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر افزایش یافت و ضریب نیرو-فرکانس در هندسه‌های مربوطه همانند قبل اندازه‌گیری شد. شکل ۱۰ (الف) اثر تغییر طول پخ در مود اول حسگر را نشان می‌دهد.

همانطورکه می‌بینیم با کاهش عرض پخ حساسیت حسگر افزایش می‌یابد. البته در عمل نمی‌توان به صورت نامحدود عرض پخ را کاهش داد زیرا باعث ناپایداری مکانیکی حسگر می‌گردد. شکل ۱۰ (ب) مربوط به اثر عرض پخ در خطای دمایی حسگر در زاویه ۵۰ درجه است که همانطورکه می‌بینیم خطای دمایی حسگر تغییر محسوسی نمی‌یابد بنابراین کاهش عرض پخ در مجموع اثر مطلوبی بر حسگر کوارتزی دارد. با توجه به شکل ۱۰ (ب)، مقدار درصد خطای دمایی در مود اول برای طول لبه ۵/۲ میلی‌متر را می‌توان با رابطه (۷) محاسبه نمود که در حدود ۵/۵ درصد بدست می‌آید.

۷-نتیجه‌گیری

وابستگی ضرایب نیرو-فرکانس در کوارتز به دما و زاویه اعمال نیرو، امکان طراحی حسگرهای نیروی دو حالته را فراهم می‌سازد. در این مقاله یک حسگر نیروی دو حالته طراحی شده است. این حسگر در دو مود کاری حساسیت بالا و خطای دمایی پایین کار می‌کنند. در طی بررسی‌های صورت گرفته، نمودارهای ضریب نیرو-فرکانس در مودهای کاری اول و دوم و نمودار خطای دمایی ضریب نیرو-فرکانس در مود دوم کاری حسگر بدست آمد تا از این نمودارها برای انتخاب صحیح زاویه تمایل برای لودسل‌های کوارتزی استفاده گردد. همچنین

اثر تغییر ابعاد پخ‌های اعمال نیرو در مود کاری اول بررسی شد و نتایج زیر حاصل گشت:

در مود اول بیشینه حساسیت، وابسته به طول پخ اعمال نیرو است و برای پخ یک میلی‌متر این حساسیت تا ۲۸×۱۰^{-۱۵} m.s/N قابل افزایش است. برای پخ ۲/۵ میلی‌متر که در این پژوهش پیشنهاد شد این ضریب مقدار ۲۳×۱۰^{-۱۵} m.s/N دارد و درصد خطای دمایی در بازه دمایی ۰ الی ۱۰۰ درجه برابر با ۵/۵ درصد است. در مورد دوم خطای دمایی حسگر کاهش یافته است، در عین حال ضریب نیرو-فرکانس نیز مقدار کمتری دارد. به عنوان مثال در زاویه تمایل $\varphi = ۵۳^{\circ}$ خطای دمایی به صفر می‌رسد و ضریب نیرو فرکانس حسگر $۷/۴۳\times۱۰^{-۱۵}$ m.s/N است. همچنین در زاویه تمایل $\varphi = ۵۰^{\circ}$ درجه ضریب نیرو فرکانس حسگر ۹×۱۰^{-۱۵} m.s/N و خطای دمایی یک درصد است. بنابراین انتخاب زاویه تمایل مناسب در مود دوم وابسته به خطای مجاز دمایی حسگر است و به کمک نمودار خطای دمایی که در این مقاله ارائه شده قابل انجام است. علاوه بر این نشان داده شد که با کاهش طول پخ می‌توان حساسیت حسگر را در مود اول افزایش داد بدون آن‌که اثر چندانی روی خطای دمایی حسگر داشته باشد.

ایده طراحی حسگرهای دو حالته که در این مقاله به آن اشاره شده است ممکن است بتواند برای سایر حسگرهای نیروی پیزوالکتریک نیز بسته به نوع کریستال و ساختارشان مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از سرکار خانم مهندس مهسا سادات رشیدی که در ویرایش ادبی و ظاهری متن و تصاویر این مقاله کمک شایانی نمودند متشکرم.

فهرست علائم

C_{ij}^{θ}	ضریب سفتی مرتبه دو در دمای کریستال
C_{ijk}	ضرایب سفتی مرتبه سه (غیرخطی)
$\tilde{C}_{ij}^{(n)}$	مشتق دمایی مرتبه n ضریب سفتی درجه دو
D	قطر نوسانگر (m)
E_i^0	کرنش‌های مرتبه صفر میندلین
$E_{ij}^{(n)}$	مولفه‌های درجه nام کرنش
F	نیروی اعمال شده (N)
Δf	تغییر فرکانس
f_0	فرکانس اولیه
K	ضریب نیرو فرکانس (m.s/N)
n	شماره هارمونیک موج ضخامتی برشی
S_{ij}	کامپلیاس کوارتز
$U_{1,1}^{(0)}$	گرادیان جابجایی مرتبه صفر میندلین
$X2$	محور ضخامت
x_3	محور اصلی
ψ	زاویه تمایل جفت پخ اول نسبت به محور اصلی
φ	زاویه تمایل جفت پخ دوم نسبت به محور اصلی

مراجع

[1] R. Langdon, Resonator sensors-a review, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 18(2) (1985) 103.

[2] J. Ratajski, Force-frequency coefficient of singly rotated vibrating quartz crystals, IBM Journal of Research and Development, 12(1) (1968) 92-99.

[3] D.L. Hammond, A. Benjaminson, The crystal resonator-a digital transducer, IEEE spectrum, 6(4) (1969) 53-58.

[4] E. EerNisse, J. Paros, Practical considerations for miniature quartz resonator force transducers, QUARTEX INC SALT LAKE CITY UT, 1983.

[5] R.G. Kirman, R.M. Langdon, Force sensors, in, Google Patents, 1986.

[6] Y. Amand, J.-P. Peghaire, Vibrating beam force-frequency transducer, in, Google Patents, 1996.

[7] C. Gehin, C. Barthod, Y. Teisseyre, Design and characterisation of a new force resonant sensor, Sensors and Actuators A: Physical, 84(1-2) (2000) 65-69.

[8] J.P. Corbett, Oscillating crystal force transducer system, in, Google Patents, 1970.

[9] B. Dulmet, R. Bourquin, N. Shibanova, Frequency-output force sensor using a multimode doubly rotated

quartz resonator, Sensors and Actuators A: Physical, 48(2) (1995) 109-116.

[10] Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, G. Feng, Off-centre load-insensitive digital quartz resonator force sensor, IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 148(5) (2001) 215-220.

[11] Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, G. Feng, A thickness-shear quartz resonator force sensor with dual-mode temperature compensation, IEEE sensors journal, 3(4) (2003) 490-496.

[12] A. Asakura, T. Fukuda, F. Arai, Design, fabrication and characterization of compact force sensor using AT-cut quartz crystal resonators, in: Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 2008, pp. 506-511.

[13] Y. Murozaki, F. Arai, Wide range load sensor using quartz crystal resonator for detection of biological signals, IEEE Sensors journal, 15(3) (2015) 1913-1919.

[14] Y. Murozaki, S. Sakuma, F. Arai, Improvement of the Measurement Range and Temperature Characteristics of a Load Sensor Using a Quartz Crystal Resonator with All Crystal Layer Components, Sensors, 17(5) (2017) 1067.

[15] T.T. Pham, H. Zhang, S. Yenuganti, S. Kaluvan, J.A. Kosinski, Design, Modeling, and Experiment of a Piezoelectric Pressure Sensor Based on a Thickness-Shear-Mode Crystal Resonator, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(11) (2017) 8484-8491.

[16] F. Chen, J. Gao, W. Tian, Force-frequency characteristics of multi-electrode quartz crystal resonator cluster, Sensors and Actuators A: Physical, 269 (2018) 427-434.

[17] M. Mohammadi, H. Daneshpajooh, M. Hamedi, Effect of anisotropy and piezoelectricity on the force-frequency coefficient of AT-cut quartz crystals, Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering, 23(5) (2016) 2203.

[18] C.R. Dauwalter, The temperature dependence of the force sensitivity of AT-cut quartz crystals, in: 26th Annual Symposium on Frequency Control. 1972, IEEE, 1972, pp. 108-112.

[19] P. Lee, Y. Wang, X. Markenscoff, High− frequency vibrations of crystal plates under initial stresses, The Journal of the Acoustical Society of America, 57(1) (1975) 95-105.

[20] M. Mohammadi, M. Hamedi, H. Daneshpajooh, High-frequency vibrations of quartz crystals subject to initial thermo-mechanical bias, Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering, 24(2 ((2017 (684-697.

[21] H. Zhang, J.A. Turner, J. Yang, J.A. Kosinski, Force–frequency effect of thickness mode langasite resonators, Ultrasonics, 50(4-5) (2010) 479-490.

[22] M.S. Patel, Nonlinear behavior in quartz resonators and its stability, Rutgers University-Graduate School-New Brunswick, 2008.

[23] E.P. Eernisse, Temperature dependence of the force frequency effect for the AT-, FC-, SC-, and rotated X-cuts, in: 34th Annual Symposium on Frequency Control. 1980, IEEE, 1980, pp. 426-430.