

Research Paper

Gene Expression Analysis of Myrosinase (*Myro*) and Thioglucoside Glucohydrolase (*TTG*) Genes in *Capparis ovata* under the Influence of Environmental Radon Gas Radiation

Sahar Tadili¹, Ali Asghari² , Noraddin Hosseinpour Azad³, Ehsan Shokri⁴, and Seyyed Hamidreza Hashemi Petroudi⁵

- 1- PhD student in Plant Genetics and Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
- 2- Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, (Corresponding authors: asgharia2002@gmail.com)
- 3- Associate Professor, Department of Plant Sciences and Medicinal Plants, Meshginshahr Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
- 4- Assistant Professor, Department of Nanotechnology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
- 5- Assistant Professor, Agricultural Genetics and Biotechnology Research Institute of Tabarestan, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Received: 20 May, 2025

Revised: 10 September, 2025

Accepted: 18 October, 2025

Extended Abstract

Background: *Capparis ovata*, commonly known as "caper bush," belongs to the Capparidaceae family. This perennial, drought-tolerant plant is widely distributed across arid and semi-arid regions of the Middle East and the Mediterranean. It is also known by other names, such as "kavar", "lagaji", or "mountain watermelon". Due to its high adaptability to harsh environmental conditions and its content of bioactive compounds, particularly glucosinolates, this species holds significant ecological and medicinal value. These secondary metabolites, through enzymes such as myrosinase and thioglucoside glucohydrolase (TTG), play crucial roles in the plant's defense mechanisms. Despite increasing interest in *C. ovata* as a drought-resistant medicinal plant, little is known about its molecular responses to environmental stresses such as ionizing radiation. Radon is a naturally occurring radioactive gas and one of the main sources of environmental ionizing radiation. While its effects on human health are well documented, its impact on plant molecular biology remains largely unknown. Myrosinase and TTG are two key enzymes in *C. ovata*, involved in plant defense against herbivores by hydrolyzing glucosinolates. This study aimed to investigate the effect of environmental radon exposure on the expression of myrosinase and TTG genes in *C. ovata*.

Methods: Plant samples were collected from the mountain of Kojanagh village, located 18 km northwest of Meshginshahr (geographical coordinates: 38°29'17.7" N, 47°30'15.1" E). All geographic calculations were performed using a Garmin Oregon 650 GPS device. To obtain comprehensive information on the region's radiation pollution, a point-by-point radon radiation map was prepared at 10 locations using a Victoreen 451 radiation meter (Fluke Biomedical Company, USA) over two consecutive years. These measurements included points at similar elevations on two adjacent mountains, one with radioactive exposure (A) and another without exposure (B). Total RNA was extracted from leaf tissue, and cDNA for myrosinase and TTG genes was synthesized for expression analysis (qRT-PCR). Gene expression levels were normalized to actin as a reference gene. Relative gene expression was calculated using the $2^{-\Delta Ct}$ method, with actin as the internal control. Statistical analysis was performed with GraphPad Prism 10 (GraphPad Software, USA). Differences in gene expression between radon-exposed and control samples were evaluated using independent t-tests, with significance set at $P < 0.05$.

Results: The analysis of myrosinase gene expression in *C. ovata* under varying radon gas levels showed that the highest increase occurred at elevations of 910–920 meters (site A), with an average radiation intensity of 0.8 mSv, where gene expression exceeded seven times that of the non-radioactive control area. At elevations of 930–940 meters (site A), with an average intensity of 1.8 mSv, a roughly fourfold increase was observed compared to the control. Gene expression was lower in the other elevations. These findings suggest a nonlinear, elevation-dependent response in myrosinase gene expression, with optimal stimulation at mid-elevations (910–920 meters). The TTG gene expression pattern showed similar changes across elevation ranges, with



the highest expression also at 910–920 meters (about fourfold higher than the control). In this range, the standard error was relatively high, indicating variability among samples. A significant increase was also observed at 880–900 meters (about 2.5 times higher than the control). At lower (830–860 meters) and higher (950–1000 meters) elevations, expression levels were approximately 1.5 and 1.8 times higher, respectively. The lowest gene expression, such as myrosinase, was observed at 880–900 meters. Both Myro and TTG genes exhibited similar expression patterns under different radon exposures, with the highest increase at mid-elevations (910–920 meters, 0.8 mSv average radiation). This study highlights Myro as a potential molecular marker for radon stress in *C. ovata*.

Conclusion: The findings indicate that environmental radon acts as a strong stressor, triggering molecular defense responses in *C. ovata*. Prolonged exposure of perennial plants to radioactive radiation may induce genetic mutations, alter the structure and function of enzymes in secondary metabolite biosynthetic pathways, and elicit protective responses against free radical damage, likely through the stimulation of plant defense pathways during specific radon exposure intervals. Myro and TTG genes play key roles in secondary defense and detoxification pathways, and their increased expression may reflect the heightened activity of oxidative stress response systems under specific environmental conditions. Additionally, differences in gene response across elevation ranges may be attributed to actual radon concentrations, environmental factors, absorption rates, and tissue sensitivity. This study provides the first evidence that environmental radon exposure increases the expression of key defense-related genes in *C. ovata*, with implications for plant adaptation, ecological interactions, and crop quality in radon-contaminated areas. Consequently, environmental radioactive pollutants highlight the need for further research into the molecular mechanisms of plant responses.

Keywords: Defense mechanism, Environmental stress, Gene response, Glucosinolate, radioactive

How to Cite This Article: Tadili, S., Asghari, A., Hosseinpour Azad, N., Shokri, E., Hashemi Petroudi, S.H. (2026). Gene Expression Analysis of Myrosinase (*Myro*) and Thioglucoside Glucohydrolase (*TTG*) Genes in *Capparis ovata* under the Influence of Environmental Radon Gas Radiation. *J Crop Breed*, 18(1), 69-79. DOI: 10.61882/jcb.2026.1620



مقاله پژوهشی

آنالیز بیان ژن‌های میروزیناز و تیوگلوکوزید گلوکوهیدرولاز (TTG) در گیاه لگجی *Capparis ovata* تحت تأثیر تشعشعات حاصل از گاز رادون محیطی

سحر تعدیلی^۱، علی اصغری^۲، نورالدین حسین پور آزاد^۳، احسان شکری^۴ و سید حمیدرضا هاشمی پطودی^۵

۱- دانشجوی دکتری ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
(نویسنده مسوول: asgharia2002@gmail.com)

۳- دانشیار، گروه علوم گیاهی و گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی مشگین‌شهر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۴- استادیار، بخش فناوری نانو، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۵- استادیار، پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹
صفحه: ۶۹ تا ۷۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: گیاه لگجی با نام علمی *Capparis ovata* از خانواده Capparidaceae است. این گیاه با نام‌های دیگری از جمله کور، لگجی یا هندوانه کوهی نیز شناخته می‌شود. گیاهی چندساله و خشکی‌دوست که در مناطق خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه و حوزه مدیترانه به‌طور گسترده‌ای پراکنش دارد. این گونه به دلیل توانایی بالا در سازگاری با شرایط نامساعد محیطی و برخورداری از ترکیبات زیست‌فعال از جمله گلوکوزینولات‌ها، از ارزش بوم‌شناختی و دارویی بالایی برخوردار است. این متابولیت‌های ثانویه از طریق آنزیم‌هایی مانند میروزیناز (Myro) و تیوگلوکوزید گلوکوهیدرولاز (TTG) نقش مهمی در سازوکارهای دفاعی گیاه ایفا می‌کنند. با وجود توجه روزافزون به این گونه به‌عنوان گیاهی دارویی مقاوم به خشکی، اطلاعات اندکی در باره پاسخ‌های مولکولی آن به تنش‌های زیست‌محیطی نظیر پرتوهای یون‌ساز وجود دارد. رادون یک گاز رادیواکتیو طبیعی و یکی از منابع اصلی تابش یونیزان محیطی است. در حالی که اثرات آن بر سلامت انسان به خوبی مستند شده‌اند، تأثیرات آن بر زیست‌شناسی مولکولی گیاهان تا حد زیادی ناشناخته باقی مانده‌اند. میروزیناز و تیوگلوکوزید گلوکوهیدرولاز (TTG) دو آنزیم کلیدی در گیاه *Capparis ovata* هستند و در دفاع گیاه در برابر علف‌خواران با هیدرولیز گلوکوزینولات نقش دارند. هدف این مطالعه بررسی تأثیر مواجهه با رادون محیطی بر بیان ژن‌های میروزیناز و TTG در *C. ovata* بود.

مواد و روش‌ها: نمونه‌برداری مواد گیاهی از ارتفاعات روستای کوچنق واقع در هیجده کیلومتری شمال غربی شهرستان مشگین‌شهر با موقعیت جغرافیایی $38^{\circ} 29' 17''$ شمالی و $50^{\circ} 30' 15''$ شرقی انجام شد. کلیه محاسبات مربوط به موقعیت جغرافیایی با استفاده از دستگاه مکان‌یاب ماهواره‌ای گارمین (مدل اورگون ۶۵۰) صورت پذیرفت. برای دسترسی کامل به اطلاعات آلودگی تابشی منطقه مورد مطالعه، نقشه تشعشعات رادونی نقطه به نقطه در ده نقطه هم ارتفاع با استفاده از دستگاه تابش‌سنج ۴۵۱۷Victoreen (Fluke Biomedical Company, USA) طی دو سال متمادی تهیه شد. این اندازه‌گیری‌ها مشتمل بر نقاط هم ارتفاع در دو کوه مجاور هم (کوه دارای نقاط حاوی مواد رادیواکتیو A و فاقد مواد رادیواکتیو B) بودند. نمونه‌های *C. ovata* از مناطقی با ارتفاعات و سطوح مختلف رادون محیطی جمع‌آوری شدند و RNA کل از بافت برگ استخراج و cDNA ژن‌های میروزیناز و TTG برای آنالیز بیان (qRT-PCR) سنتز گردید. سطوح بیان نسبی ژن و میزان تغییرات بیان ژن‌ها (Fold Change) با استفاده از روش $2^{-\Delta\Delta Ct}$ و $2^{-\Delta Ct}$ با استفاده از الگوی بیانی ژن اکتین به‌عنوان کنترل داخلی محاسبه شدند. تحلیل آماری با نرم‌افزار ۱۰ GraphPad Prism (شرکت GraphPad Software، آمریکا) انجام گرفت و تفاوت‌های بیان ژن بین نمونه‌های در معرض رادون و کنترل با آزمون t در سطح احتمال $P < 0.05$ ارزیابی شدند.

یافته‌ها: بررسی تغییرات بیان ژن میروزیناز (Myrosinase) در گیاه *Capparis ovata* در مواجهه با سطوح مختلف گاز رادون نشان داد که بیشترین میزان افزایش بیان ژن در بازه ارتفاعی ۹۱۰A-۹۲۰ متر با میانگین شدت تشعشع ۰/۸ میلی‌سیورت قابل مشاهده بود، به‌طوری‌که بیان ژن به بیش از هفت برابر نمونه‌های ناحیه غیر رادیواکتیو (شاهد) رسید. در ارتفاعات ۹۳۰A-۹۴۰ متر با میانگین شدت تشعشع ۱/۸ میلی‌سیورت نیز افزایش حدود چهار برابر نسبت به شاهد مشاهده شد، اما در سایر ارتفاعات بیان ژن در حد پایین‌تری قرار داشت. این یافته‌ها می‌توانند یک پاسخ غیر خطی و ارتفاع‌محور را در بیان ژن میروزیناز نشان دهند. به‌طوری‌که سطح پهنه تحریک در ارتفاعات میانی (۹۱۰-۹۲۰ متر) رخ داد. الگوی بیان ژن TGG نیز تحت تأثیر بازه‌های مختلف ارتفاعی تغییراتی مشابه را نشان داد. بیشترین میزان بیان ژن TGG نیز در ارتفاع ۹۱۰A-۹۲۰ متر ثبت شد (حدود چهار برابر تیمار شاهد). در این بازه، خطای استاندارد نیز نسبتاً بالا بود که نشان‌دهنده تغییرپذیری پاسخ بین نمونه‌ها است. در ارتفاع ۸۸۰A-۹۰۰ متر نیز افزایش معناداری نسبت به شاهد مشاهده شد (حدود دو و نیم برابر). در حالی‌که، در ارتفاعات پایین‌تر (۸۳۰A-۸۶۰) و بالاتر (۹۵۰A-۱۰۰۰) میزان بیان به‌ترتیب حدود (یک و نیم و یک و هشت دهم برابر) بود و کمترین مقدار تغییر در بیان ژن نیز مانند ژن میروزیناز، در ارتفاع ۸۸۰A-۹۰۰ مشاهده شد. هر دو ژن مورد بررسی Myro و TGG در شرایط مواجهه با سطوح مختلف رادون، الگوی مشابهی از افزایش بیان را در ارتفاعات میانی، به‌ویژه در بازه ۹۱۰-۹۲۰ متر با میانگین شدت تشعشع ۰/۸ میلی‌سیورت نشان دادند.

نتیجه‌گیری کلی: یافته‌ها نشان می‌دهند که رادون محیطی به‌عنوان یک تنش قوی عمل می‌کند و واکنش‌های دفاعی مولکولی را در *C. ovata* برمی‌انگیزد. هم‌چنین، قرار گرفتن طولانی‌مدت گیاهان چندساله در معرض تابش‌های رادیواکتیو می‌تواند با ایجاد جهش‌های ژنتیکی، ساختار و عملکرد آنزیم‌های مسیرهای بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه را تغییر داده، نوعی واکنش محافظتی در برابر آسیب رادیکال‌های آزاد ایجاد کند که می‌تواند ناشی از تحریک مسیرهای دفاعی گیاه در این بازه خاص از مواجهه با گاز رادون باشد. ژن‌های Myro و TGG نقش کلیدی در مسیرهای دفاعی ثانویه و سم‌زدایی دارند، و افزایش بیان آن‌ها می‌تواند بیانگر فعالیت شدیدتر سامانه‌های مقابله با تنش اکسیداتیو در شرایط خاص محیطی باشد. هم‌چنین، تفاوت بین پاسخ ژنی در بازه‌های ارتفاعی مختلف می‌تواند به تفاوت در غلظت واقعی گاز رادون، شرایط زیست‌محیطی، میزان جذب و حساسیت بافت‌های گیاه وابسته باشد. این مطالعه اولین شواهد را ارائه می‌دهد که مواجهه با رادون محیطی باعث افزایش بیان ژن‌های اصلی مرتبط با دفاع در *C. ovata* می‌شود که پیامدهایی برای سازگاری گیاه، تعاملات بوم‌شناختی و کیفیت محصولات گیاهی در مناطق آلوده به رادون دارد. در نتیجه، آلاینده‌های رادیواکتیو محیطی بر لزوم تحقیقات بیشتر درباره مکانیزم‌های مولکولی واکنش گیاهان تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تنش محیطی، رادیواکتیو، مکانیزم دفاعی، پاسخ ژنی، گلوکوزینولات

مقدمه

مطالعه بیان ژن‌های آنزیم میروزیناز در گیاهان تحت مواجهه با رادون محیطی، حوزه‌ای پیشرو است که زیست‌شناسی مولکولی گیاهان را با رادیوبیولوژی محیطی تلفیق می‌کند. رادون گازی رادیواکتیو است که به طور طبیعی از تجزیه اورانیوم در پوسته زمین تولید می‌شود. اگرچه اثرات سلامتی رادون در انسان، به‌ویژه به‌عنوان دومین عامل اصلی سرطان ریه، به‌طور گسترده بررسی شده است، تأثیر آن بر سیستم گیاهی تا حد زیادی ناشناخته مانده است (Li et al., 2018). درک این‌که چگونه مواجهه با رادون بر بیان ژن‌ها در گیاهان، به‌ویژه مسیرهای مهم متابولیسم و دفاع مانند میروزیناز تأثیر می‌گذارد، اهمیت دارد. میروزیناز آنزیمی مهم در *C. ovata* و سایر گیاهان خانواده براسیکا است که گلوکوزینولات‌ها را به ترکیبات زیست‌فعال مانند ایزوتیوسیانات‌ها، نیتریل‌ها و تیوسیانات‌ها کاتالیز می‌کند. این محصولات هیدرولیز به‌دلیل وظیفه‌شان در محافظت از گیاه در برابر علف‌خواران و عوامل بیماری‌زا، همچنین به خاطر خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدسرطانی‌شان، برای سلامت انسان شناخته شده‌اند (Halkier & Gershenzon, 2006). تنظیم بیان ژن میروزیناز به محرک‌های محیطی مانند تنش‌های زیستی، خشکی و شوری حساس است. با این‌حال، تأثیر تابش یونیزان، به‌ویژه رادون، بر بیان ژن میروزیناز به‌طور سیستماتیک بررسی نشده است. با توجه به آسیب DNA ناشی از رادون، ایجاد تنش اکسیداتیو و توانایی تغییر بیان ژن در سلول‌های پستانداران، منطقی است که واکنش‌های استرس مولکولی مشابهی در گیاهان رخ دهد و احتمالاً مسیرهای متابولیت ثانویه و بیان میروزیناز را تغییر دهد. مواجهه با رادون منجر به انتشار ذرات آلفا با انتقال انرژی خطی بالا می‌شود که آسیب‌های مولکولی قابل توجهی از جمله شکست رشته‌های DNA، ناهنجاری‌های کروموزومی و استرس اکسیداتیو ایجاد می‌کند. مطالعات بر روی سلول‌های انسانی نشان داده‌اند که رادون باعث تغییر بیان ژن‌های مرتبط با آپوپتوز، عملکرد میتوکندری، تنظیم ایمنی و فرآیندهای متابولیک می‌شود. به‌عنوان مثال، آنالیزهای پروتئومیک سلول‌های اپیتلیال (Epithelial cells) ریه که در معرض دز بالای رادون قرار گرفته‌اند، تغییراتی را در پروتئین‌های مرتبط با آپوپتوز ناشی از استرس و سازگاری میتوکندریایی نشان داده‌اند (Kreuzer et al., 2015). به‌طور مشابه، مطالعات ترنسکریپتومیک بر روی بافت‌های سرطان پستان که در معرض رادون محیطی قرار گرفته‌اند، تعدیل مسیریایی مانند سیگنالینگ MAPK (Mitogen-Activated Protein Kinase) و بیوسنتز فسفوپولین را شناسایی کرده‌اند که در سرطان‌زایی ناشی از تابش نقش دارند (Xie et al., 2020). این یافته‌ها توانایی شبکه‌های تنظیم‌کننده ژن و عملکردهای سلولی را برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند گیاهانی که با رادون محیطی تماس دارند نیز می‌توانند پروفایل‌های بیان ژنی تغییر یافته‌ای از جمله کنترل فعالیت میروزیناز را نشان دهند.

گیاه لگجی *C. ovata* که به‌عنوان گیاه کاپر نیز شناخته می‌شود، در مناطق خشک و نیمه‌خشک پراکندگی وسیعی دارد و به‌خاطر غنچه‌های خوراکی و خواص دارویی‌اش ارزشمند است که بسیاری از آن‌ها با متابولیسم گلوکوزینولات مرتبط هستند. آنزیم میروزیناز نه تنها در دفاع در برابر تنش‌های زیستی در *C. ovata* نقش دارد، بلکه بر ارزش غذایی و دارویی گیاه نیز تأثیر می‌گذارد. تنش‌های محیطی مانند رادون می‌توانند بیان ژن‌های میروزیناز را تغییر دهند و بر بیوسنتز ترکیبات غنی از گلوکوزینولات و در نهایت بر انعطاف‌پذیری گیاه و کیفیت محصول تأثیر بگذارند (Özcan, 2007). بررسی واکنش‌های مولکولی *C. ovata* به مواجهه با رادون برای درک چگونگی تأثیر آلودگی رادیواکتیو بر سلامت گیاه، تعاملات بوم‌شناختی و بهره‌وری کشاورزی ضروری است. این مطالعه با ترکیب آنالیزهای qPCR و پایش رادون محیطی، به‌دنبال روشن کردن اثرات مواجهه با رادون بر بیان ژن میروزیناز (*Myro*) و ژن تیوگلوکوزید گلوکوئیدرولاز (*TTG*) در گیاه لگجی *C. ovata* صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

ناحیه مطالعه و جمع‌آوری نمونه

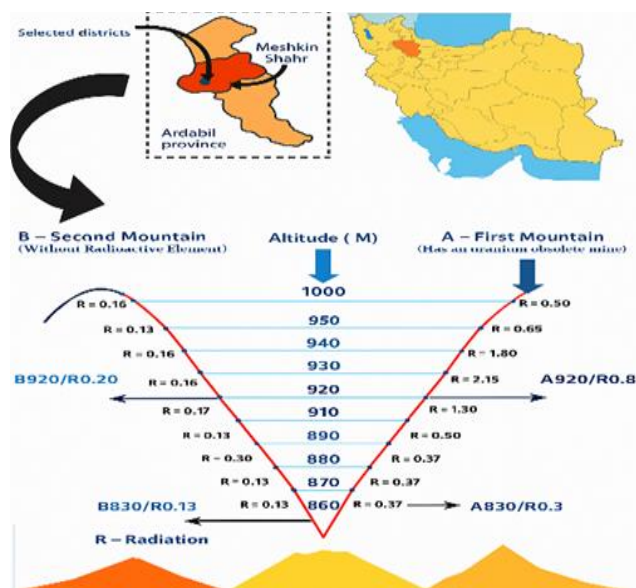
مواد گیاهی به‌صورت نمونه‌گیری سیستماتیک از گونه *C. ovata* از ارتفاعات روستای کوجنق، واقع در ۱۸ کیلومتری شهر مشگین‌شهر با مختصات جغرافیایی ۳۸° ۲۹' ۱۷.۷" شمالی و ۴۷° ۳۰' ۱۵.۱" شرقی جمع‌آوری شدند. موقعیت جغرافیایی دقیق هر نقطه نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه GPS مدل Garmin Oregon ۶۵۰ تعیین گردید. برای ارزیابی گسترده میزان مواجهه با رادون محیطی در منطقه مورد مطالعه، از آشکارساز رادون Victoreen ۴۵۱ (Fluke Biomedical Company, USA) به‌مدت دو سال متوالی استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در نقاطی با ارتفاع یکسان در دو کوه مجاور هم: A: نقاط با سطح بالای رادون (در معرض رادون)، B: نقاط با سطح زمینه‌ای رادون (گروه کنترل) انجام شدند (شکل ۱، جدول ۱).

نمونه‌برداری و آماده‌سازی

در هر سایت، بافت‌های جوان برگ و ساقه *C. ovata* به‌صورت سیستماتیک در سه تکرار بیولوژیکی مستقل نمونه‌برداری شدند. تمام نمونه‌ها بلافاصله در نیتروژن مایع در محل جمع‌آوری قرار گرفتند و به آزمایشگاه منتقل شدند.

استخراج RNA و سنتز cDNA

با استفاده از کیت RNX-Plus (شرکت یکتا تجهیز، ایران) و طبق دستورالعمل سازنده، RNA کل از بافت‌های منجمد برگ استخراج گردید. کیفیت و غلظت RNA با الکتروفورز ژل آگاروز و اسپکتروفتومتری نانودراپ (شرکت Thermo Scientific، آمریکا) ارزیابی شدند. برای حذف آلودگی DNA ژنومی، نمونه‌ها با DNase I (شرکت Fermentas، لیتوانی) تیمار شدند. سنتز cDNA (هترودوپلکس) با استفاده از ۱ میکروگرم RNA کل و کیت سنتز cDNA تک‌رشته‌ای (شرکت Thermo Scientific، آمریکا) و آغازگر Oligo(dt) انجام گرفت.

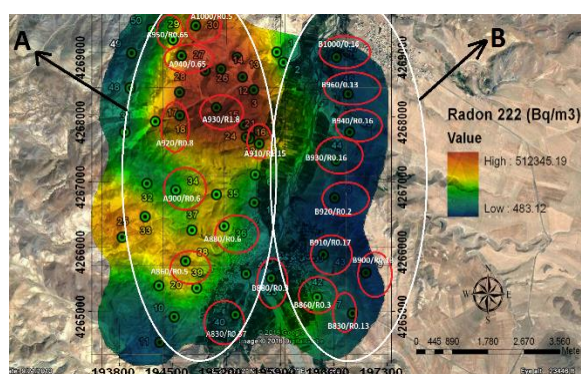


شکل ۱- نقشه شماتیکی نقاط نمونه برداری، ارتفاع و شدت تشعشعات رادیواکتیو در دو کوه مجاور هم (کوه اول (A) با تشعشعات رادیواکتیو بالا و کوه دوم (B، شاهد) بدون تشعشعات رادیواکتیو).

Figure 1. Schematic distribution of sampling points, altitude, and radiation intensity in two adjacent mountains (the first mountain with high radiation (A) and the second mountain without radon radiation (B)).

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی، ارتفاع و شدت تشعشعات رادونی در نقاط نمونه برداری A و B

A				B					
موقعیت Location	تثعشع Exposure (μ Sv)	ارتفاع Altitude (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	موقعیت Location	تثعشع Exposure (μ Sv)	ارتفاع Altitude (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
A830/R0.37	0.37	830	38°30'08/90"	47°31'30/09"	B830/R0.13	0.13	830	38°20'08/93"	47°31'20/11"
A860/R0.5	0.5	860	38°30'08/91"	47°31'80/09"	B860/R0.3	0.3	860	38°20'08/83"	47°31'20/13"
A880/R0.6	0.6	880	38°30'08/93"	47°31'20/08"	B880/R0.3	0.3	880	38°20'08/63"	47°31'20/15"
A900/R0.6	0.6	900	38°30'08/99"	47°31'20/85"	B900/R0.13	0.13	900	38°30'08/73"	47°31'20/14"
A910/R1.15	1.15	910	38°30'08/92"	47°31'20/84"	B910/R0.17	0.17	910	38°30'08/43"	47°31'20/09"
A920/R0.8	0.8	920	38°30'08/96"	47°31'20/19"	B920/R0.2	0.2	920	38°20'08/23"	47°31'20/11"
A930/R1.8	1.18	930	38°30'08/97"	47°31'20/29"	B930/R0.16	0.16	930	38°30'08/63"	47°31'20/14"
A940/0.65	0.65	940	38°30'08/95"	47°31'20/18"	B940/R0.16	0.16	940	38°30'08/43"	47°31'20/15"
A950/R0.65	0.65	950	38°30'08/9"	47°31'20/01"	B960/0.13	0.13	950	38°20'08/13"	47°31'20/18"
A1000/R0.5	0.5	1000	38°30'08/98"	47°31'20/05"	B1000/0.16	0.16	1000	38°30'08/53"	47°31'20/15"



شکل ۲- نقشه پراکنندگی غلظت گاز رادون محیطی در نقاط نمونه برداری رادیواکتیو (A) و غیر رادیواکتیو (B)
Figure 2. The radon gas concentration distribution map Rn²²² at sampling points in radioactive (A) and none radioactive areas

طراحی آغازگر
Primer-BLAST تأیید شدند. ژن اکتین *C. ovata* به عنوان
ژن مرجع برای نرمال سازی استفاده گردید. برای تأیید دقت
آغازگرها، آزمون PCR با استفاده از cDNA سنتز شده از

نرم افزار (http://www.primer3plus.com) Primer3Plus
و با ابزارهای (IDT) OligoAnalyzer و NCBI طراحی و

مستر میکس SYBR Green، ۰/۵ میکرولیتر از هر آغازگر (۱۰ میکرومولار)، ۲ میکرولیتر قالب cDNA و ۷ میکرولیتر آب عاری از نوکلئاز بود. شرایط چرخه qRT-PCR به شرح زیر بود: واسرشت سازی اولیه: ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه، ۴۰ چرخه شامل: ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ثانیه، ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ ثانیه، ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ ثانیه. تمام واکنش‌ها برای هر تکرار بیولوژیکی سه بار انجام شدند.

نمونه‌های کنترل و نمونه‌های در معرض رادون انجام شد (جدول ۲).

واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی در زمان واقعی (qRT-PCR)

تحلیل کمی بیان ژن میروزیناز و TTG با استفاده از دستگاه Real-Time PCR ۳۰۰۰ Corbett Rotor-Gene (شرکت Qiagen، آلمان) و کیت SYBR Green Ampliqon Master Mix High ROX (شرکت Ampliqon، دانمارک) انجام شد. هر واکنش با حجم ۲۰ میکرولیتر شامل ۱۰ میکرولیتر

جدول ۲- آغازگرهای طراحی شده برای تکثیر ژن‌های میروزیناز و تیوگلوکوزید گلوکوئیدرولاز

Table 2. Primers designed for the amplification of Myrosinase and TTG genes

ردیف Num.	نام آغازگرها Primr Name	آغازگر رفت Forward Primer (5'→3')	آغازگر برگشت Reverse Primer (5'→3')
1	CoMyro1	GGTGTGAGGTTGATGCTGA	CAGGAGGATGATGTTGTTGG
2	CoMyro2	GCTGTGTTGCTGCTGTTG	AGGAGGAGGATGATGTTGG
3	CoMyro	GATCCAGACAGCATAGCTG	GATTATGGCTTGGTTGGGG
4	CsTGG	AGCAGGTTGATGCTGGTGT	TGTTGTTGCTGCTGCTGTTG
5	CsMyro01	ATGACACTGATCCAGACTCC	TAGGACTTGGCTGGACATAC
6	Actin	GCCCTGCTATGTATGTTGC	GTCCAAAGCAATGTAGCGGAG

تنظیم آن تحت شرایط متفاوت تری صورت می‌گیرد. این نتایج نشان می‌دهند که مواجهه طبیعی با رادون به‌طور قاطع بیان ژن میروزیناز را در *C. ovata* نسبت به کنترل افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، هر دو ژن به مواجهه با رادون واکنش نشان دادند که بیانگر پاسخ گیاه به استرس با دفاع از طریق مکانیسم‌های خود در سطوح بیان ژن‌ها است. به‌خوبی اثبات شده است که میروزیناز ممکن است پروتئین کلیدی در مسیر متابولیسم گلوکوزینولات‌ها باشد و در پاسخ به استرس‌های غیر زیستی مختلف مانند خشکی، شوری و فلزات سنگین افزایش بیان دارد (Kumar et al., 2017; Wang et al., 2019). اگرچه مطالعات مستقیمی درباره تأثیر رادون محدود است، الگوهای مشابه افزایش بیان در گیاهان تحت فشارهای اکسیداتیو و فلزات سنگین گزارش شده است و این فرضیه را تقویت می‌کند که رادون نیز مکانیسم‌های دفاعی مشابهی را فعال می‌کند (Maleki et al., 2017; Zhang et al., 2018). احتمالاً به‌دلیل نقش آن به‌عنوان منبع تنش اکسیداتیو ناشی از تابش، مطابق با تحقیقات مرتبط، مواجهه با تنش‌های غیر زیستی مانند تابش UV، تابش گاما و شوری باعث افزایش بیان ژن میروزیناز در *Capparis* و گونه‌های مرتبط می‌شود که اغلب منجر به افزایش تولید متابولیت‌های محافظتی می‌گردد (Kumar et al., 2017; Singh & Sharma, 2018). افزایش بیان میروزیناز تحت استرس با افزایش تولید ایزوتیوسیانات‌ها و سایر ترکیبات محافظتی مرتبط است که به گیاه کمک می‌کند تا آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن و سایر عوامل تنش‌زا را کاهش دهد (Wang et al., 2019; Bhat & Vyas, 2019). مطالعات مشابه افزایش قابل توجهی در بیان میروزیناز و ژن‌های مرتبط در پاسخ به تنش‌های شدید غیرزیستی گزارش کرده‌اند (Zhang et al., 2018; Yan et al., 2014). این یافته‌ها شواهد جدیدی را ارائه می‌دهند که مواجهه با رادون طبیعی، مشابه سایر تنش‌های غیر زیستی، می‌تواند به‌طور قابل توجهی بیان ژن میروزیناز را در *C. ovata* فعال کند. این موضوع واکنش مولکولی تطبیقی

تحلیل داده‌ها

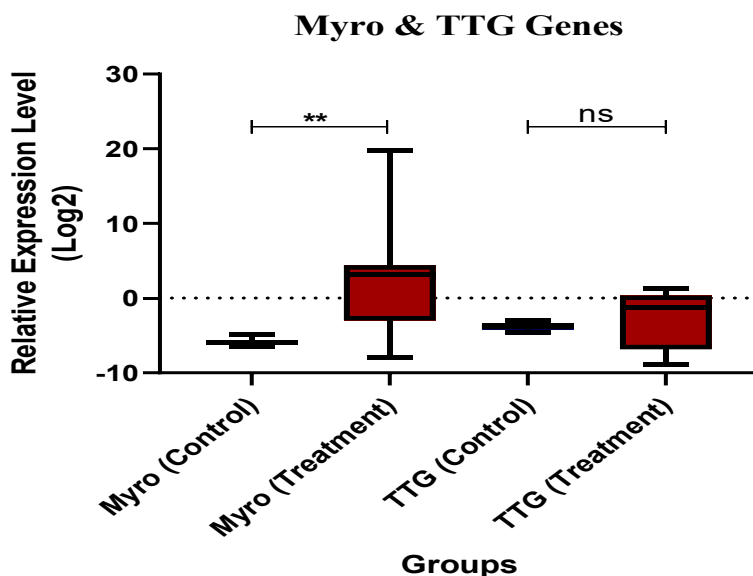
از بین آغازگرهای مورد استفاده (جدول ۲) برای تکثیر ژن کنترل کننده آنزیم میروزیناز (Myro)، آغازگرهای رفت و برگشت (CsMyro01) و برای تکثیر ژن کنترل کننده آنزیم تیوگلوکوزید گلوکوئیدرولاز (TTG) آغازگرهای رفت و برگشت (CsTGG) تکثیر قابل قبولی نشان دادند که مبنای آنالیزهای ژنتیکی قرار گرفتند. سطوح بیان نسبی ژن‌ها و مقدار تغییرات آنها در نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از فرمول $2^{-\Delta\Delta Ct}$ و $2^{-\Delta Ct}$ و با بکارگیری ژن اکتین به عنوان کنترل داخلی محاسبه شدند. تحلیل آماری با نرم‌افزار ۱۰ GraphPad Prism (شرکت GraphPad Software، آمریکا) انجام گرفت. تفاوت‌های بیان ژن بین نمونه‌های در معرض رادون و کنترل با آزمون t مستقل ارزیابی شدند و سطح معناداری در سطح احتمال ($P < 0.01$) در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

شکل ۳ سطح بیان نسبی ژن‌های Myro (میروزیناز) و TTG را در شرایط کنترل و تیمار، به‌صورت لگاریتم پایه ۲ (\log_2) نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ژن *Myro* در نمونه‌های تیمار شده افزایش معنی‌داری را در سطح بیان نسبت به گروه کنترل نشان داده است ($P < 0.01$). به‌طوری‌که، مقدار میانگین بیان این ژن در گروه تیمار شده به حدود هفت افزایش یافته است، در حالی‌که در گروه کنترل نزدیک به صفر یا منفی است. این نتایج حاکی از آن هستند که تیمار مورد نظر موجب القای بیان ژن *Myro* شده است. در مقابل، سطح بیان ژن TTG در هر دو گروه کنترل و تیمار شده تغییر قابل توجهی نداشت و اختلاف بین آن‌ها از نظر آماری غیر معنی‌دار بود. این موضوع بیانگر آن است که تیمار اعمال‌شده تأثیری بر بیان ژن TTG نداشت. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهند که ژن *Myro* ممکن است نقش مهم‌تری در پاسخ به تیمار مورد نظر ایفا کند. در حالی‌که ژن TTG در این زمینه نقش فعالی ندارد یا

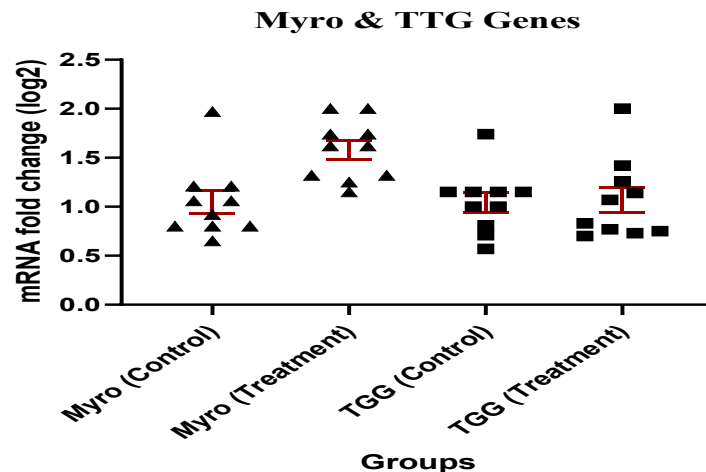
fold change بالاتر و تغییرپذیری بیشتری نسبت به گروه‌های کنترل دارند. به‌ویژه در مورد AMyro، این تغییرپذیری ممکن است بازتابی از مکانیسم‌های تنظیمی پویا یا حساسیت‌های متفاوت در بافت‌های گیاهی باشد. پاسخ برجسته ژن میروزیناز نقش بالقوه آن را در واسطه‌گری سیگنالینگ تنش یا تولید متابولیت‌های ثانویه تحت تنش رادیواکتیو نشان می‌دهد. تحقیقات روی *C. ovata* و گونه‌های مرتبط خانواده براسیکا نشان داده‌اند که میروزیناز در پاسخ به خشکی، شوری، فلزات سنگین و تابش UV و گاما افزایش بیان دارد (Yuan et al., 2010; Kumar et al., 2017; Wang et al., 2019; Singh et al., 2020). به‌عنوان مثال، *C. spinosa* تحت تنش شوری یا خشکی افزایش بیان میروزیناز با fold change لگاریتمی ۲ تا ۶ را نشان می‌دهد (Singh & Sharma, 2018). مطالعه حاضر نشان می‌دهد که رادون ممکن است به‌عنوان یک عامل تنش‌زای بسیار قوی، احتمالاً از طریق مسیرهای تنش اکسیداتیو عمل کند (Mishra et al., 2024). شواهد مستقیمی که تأثیر رادون بر بیان ژن در *Capparis* را نشان دهند، محدود هستند که اهمیت این یافته‌ها را افزایش می‌دهد. میزان افزایش بیان فراتر یا در سطح مشابه تنش‌های شدید غیر زیستی دیگر است و رادون را به‌عنوان یک عامل محیطی حیاتی که پاسخ‌های مولکولی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، معرفی می‌کند (Georgieva & Vassileva, 2023).

گیاه به استرس رادیواکتیو را برجسته می‌کند و نقش گسترده میروزیناز و TTG را در مکانیسم‌های دفاعی گیاه در برابر چالش‌های محیطی نشان می‌دهد. شکل (۴) تغییر میزان بیان (fold change) ژن‌های میروزیناز (*Myro*) و TTG را در *C. ovata* تحت مواجهه با رادون نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این نمودار بیانگر آن هستند که بیان ژن *Myro* در نمونه‌های برداشت‌شده از نقاط رادیواکتیو (گروه A) نسبت به نمونه‌های برداشت‌شده از نقاط غیر رادیواکتیو (کنترل یا گروه B) افزایش یافته است. مقدار میانگین بیان در گروه در معرض رادون به حدود ۱/۵ تا ۲ افزایش یافته است. این افزایش بیان می‌تواند ناشی از پاسخ تنظیمی ژن *Myro* به تنش ناشی از گاز رادون باشد. چرا که این ژن در مسیرهای دفاعی ثانویه و تولید ترکیبات دفاعی نقش مهمی ایفا می‌کند (Wang et al., 2019). این مسئله نشان می‌دهد که ژن TTG در شرایط در معرض رادون دستخوش تغییر بیانی معنی‌داری نشده است و احتمالاً در پاسخ به این نوع تنش فعال نمی‌شود (Bhat & Vyas, 2019). در مجموع، نتایج این آزمایش حاکی از آن است که ژن *Myro* می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر مناسب مولکولی برای بررسی پاسخ گیاه *C. ovata* به تنش رادون مطرح باشد. در حالی که ژن TTG در این فرآیند نقش بارزی ایفا نمی‌کند. علاوه بر این، TTG در معرض رادون (ATGG) تغییرپذیری کمتری دارد. این الگو نشان می‌دهد که ژن TTG پاسخ کمتری به رادون دارد و احتمالاً در سیگنالینگ تنش یا مسیرهای متابولیک نسبت به ژن میروزیناز نقشی ندارد. گروه‌های در معرض رادون (AMyro و ATGG) میانگین



شکل ۳- سطح بیان نسبی ژن‌های میروزیناز و TTG در گیاه لگجی در شرایط مختلف (رادیواکتیو و غیر رادیواکتیو)، (محور عمودی: میزان بیان نسبی، محور افقی: بیان نسبی برای ژن میروزیناز نمونه‌های محیط غیر رادیواکتیو، AMyro بیان نسبی برای ژن میروزیناز نمونه‌های محیط رادیواکتیو، BTGG بیان نسبی برای ژن TTG نمونه‌های محیط غیر رادیواکتیو، ATGG بیان نسبی برای ژن TTG نمونه‌های محیط رادیواکتیو).

Figure 3. Relative expression levels of Myrosinase (*Myro*) and TTG genes in *C. ovata* under different conditions. The Y-axis represents the relative expression level. The X-axis represents four groups: BMyro (the control group for the myrosinase gene with none radon exposure), AMyro (the radon exposure group for the myrosinase gene), BTGG (the control group for the TTG gene), ATGG (the radon exposure group for the TTG gene).



شکل ۴- نمودار مقایسه میزان تغییرات بیان ژن های میروزیناز و *TTG* در گیاه لگجی، (محور عمودی: میزان بیان نسبی، محور افقی: *BMyro*: بیان نسبی برای ژن میروزیناز نمونه های محیط غیر رادیواکتیو، *AMyro*: بیان نسبی برای ژن میروزیناز نمونه های محیط رادیواکتیو، *BTTG*: بیان نسبی برای ژن *BTTG* نمونه های محیط غیر رادیواکتیو، *ATTG*: بیان نسبی برای ژن *TTG* نمونه های محیط رادیواکتیو. Figure 4. mRNA fold change of Myrosinase (Myro) and TTG genes in *C. ovata*. (Y-axis represents the relative expression level. The X-axis represents four groups: *BMyro* (the control group for the myrosinase gene with none radon exposure), *AMyro* (the radon exposure group for the myrosinase gene), *BTTG* (the control group for the TTG gene), *ATTG* (the radon exposure group for the TTG gene).

می توان نتیجه گرفت که این سطح از مواجهه با رادون، بیشترین تأثیر القایی را بر بیان ژن میروزیناز داشته است. این یافته ها می توانند نقش مهمی را در درک پاسخ های دفاعی گیاه *C. ovata* در شرایط تنش رادیواکتیو ایفا کنند. تحلیل این نتایج نشان می دهد که مواجهه با رادون باعث تحریک بیان ژن میروزیناز در *C. ovata* می شود و تأیید می کند که تنش اکسیداتیو محیطی به عنوان یک عامل تنش زا، موجب افزایش بیان این ژن مرتبط با دفاع گیاه می گردد (Langebartels *et al.*, 2002; Kordrostami *et al.*, 2024). بر اساس داده های ارائه شده در شکل ۶ بیان ژن *TTG* در گیاه *C. ovata* در مواجهه با سطوح مختلف گاز رادون در ارتفاعات متفاوت دچار تغییر شده است. در تیمار شاهد، میزان بیان ژن در سطح پایه قرار داشت (یک) و به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. در ارتفاع 830-860 متر، بیان ژن *TTG* نسبت به شاهد افزایش یافت و به حدود ۱/۵ برابر رسید. در ارتفاع 880-900 متر، افزایش قابل توجه تری مشاهده شد (حدود ۲/۶ برابر)، که بیانگر تأثیر بیشتر مواجهه با رادون در این بازه است. بیشترین میزان بیان ژن *TTG* در ارتفاع 910-920 متر مشاهده گردید، که به حدود ۴ برابر شاهد رسید. این یافته نشان می دهد که این بازه ارتفاعی، بیشترین اثر القایی را بر بیان ژن *TTG* داشته است. همچنین، این افزایش همراه با انحراف معیار نسبتاً بالا است که ممکن است بیانگر تنوع در پاسخ پذیری نمونه ها باشد. در بازه های ارتفاعی 930-940 و 950-1000 متر، میزان بیان ژن کاهش یافت و به ترتیب به حدود ۲ و ۱/۸ برابر رسید، که بیانگر افت تدریجی پاسخ ژنی در ارتفاعات بالاتر است (شکل ۵).

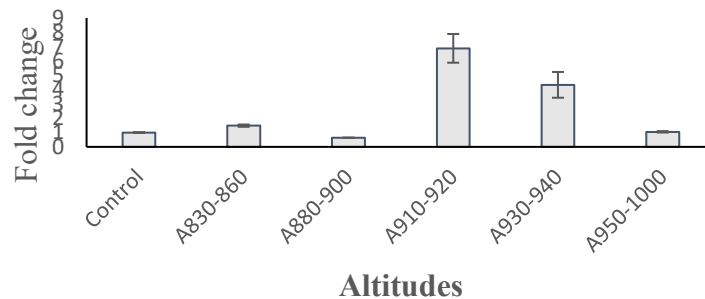
الگوی مشاهده شده در بیان ژن *TTG* مشابه ژن میروزیناز، دارای پاسخی غیر خطی به میزان مواجهه با گاز رادون است.

شکل ۵ تغییر میزان بیان ژن میروزیناز را نسبت به گروه کنترل در گروه های مختلف نمونه (ارتفاعات مختلف) که تحت غلظت های مختلف رادون قرار گرفته اند، نشان می دهد. محور Y تغییر میزان بیان میروزیناز و محور X نمونه ها را به شش دسته تقسیم می کند: کنترل (بدون مواجهه با رادون)، A830-860, A880-900, A910-920A, A930-940, A950-1000. بر اساس داده های ارائه شده در شکل ۵، بیان ژن میروزیناز در گیاه *C. ovata* تحت تأثیر سطوح مختلف مواجهه با گاز رادون در ارتفاعات متفاوت قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که میزان بیان این ژن در تیمار شاهد در پایین ترین سطح قرار داشت و به عنوان مرجع برای مقایسه با سایر ارتفاعات مورد استفاده قرار گرفت. در ارتفاعات 830-860 و 880-900 متر، افزایش جزئی در بیان ژن نسبت به شاهد مشاهده شد که از نظر بیولوژیکی قابل توجه نبود. این موضوع نشان می دهد که مواجهه با رادون در این سطوح تأثیر القایی قابل توجهی بر بیان ژن میروزیناز نداشته است. بیشترین میزان افزایش بیان ژن در بازه ارتفاعی 910-920 متر مشاهده گردید. به طوری که سطح بیان ژن در این ارتفاعات حدود ۶/۸ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. این یافته بیانگر اثر تحریک کننده شدید مواجهه با رادون در این بازه ارتفاعی بر بیان ژن میروزیناز است. در ارتفاع 930-940 متر نیز افزایش معنی داری نسبت به شاهد مشاهده شد (حدود ۴/۵ برابر)، اما نسبت به ارتفاع 910-920 کاهش نشان داد. در ارتفاع 950-1000 متر، میزان بیان ژن مجدداً کاهش یافت و به حدود سطح شاهد نزدیک شد، که حاکی از کاهش اثر تحریک کنندگی رادون در این ارتفاع است. به طور کلی، نتایج این بررسی نشان دهنده وجود یک الگوی غیر خطی در پاسخ بیان ژن میروزیناز به مواجهه با گاز رادون در ارتفاعات مختلف است. بازه ارتفاعی 910-920 متر به عنوان نقطه اوج پاسخ ژنی شناسایی شد و

(Rahbarnejad *et al.*, 2025). در تحقیق مشابهی (2018) نتیجه گرفتند که قرار گرفتن طولانی مدت گیاه درمنه کوهی در معرض تابش های رادیواکتیو احتمالاً منجر به ایجاد جهش های ژنتیکی می شود، و احتمالاً این جهش ها با تغییر ساختمان و رفتار آنزیم های دخیل در بیوسنتز متابولیت های ثانویه، یک نوع واکنش محافظتی ژنتیکی- بیوشیمیایی گیاه در برابر تنش های محیطی را موجب می شوند. در تحقیقی دیگر، حسن زاده و همکاران (Hassanzadeh *et al.*, 2022) به بررسی اثر پسماندهای معدن متروکه اورانیوم بر تغییرات بیوشیمیایی اسانس گیاه درمنه کوهی پرداختند و تغییرات معنی داری را در مقادیر متابولیت ها در نمونه های مورد مطالعه تحت تابش رادیواکتیو و شاهد مشاهده نمودند.

بیشترین میزان بیان در ارتفاع ۹۱۰-۹۲۰ متر ثبت شد که به عنوان نقطه اوج تحریک ژن می تواند مطرح باشد (شکل ۶). این یافته ها نشان می دهند که ژن *TTG* نیز مانند سایر ژن های مرتبط با دفاع گیاهی، می تواند در پاسخ به استرس های محیطی مانند مواجهه با گاز رادون فعال شود. این پاسخ ها احتمالاً بخشی از سازوکارهای دفاعی تنظیم شده توسط سیگنال های زیست محیطی در گیاه *C. ovata* هستند. از نظر زیستی، ژن *TGG* نقش حیاتی در دفاع گیاه و متابولیسم ثانویه ایفا می کند. افزایش بیان آن در پاسخ به مواجهه با رادون احتمالاً نشان دهنده مکانیزم پاسخ به تنش است که ظرفیت گیاه را برای مقابله با چالش های محیطی افزایش می دهد (Li *et al.*,)

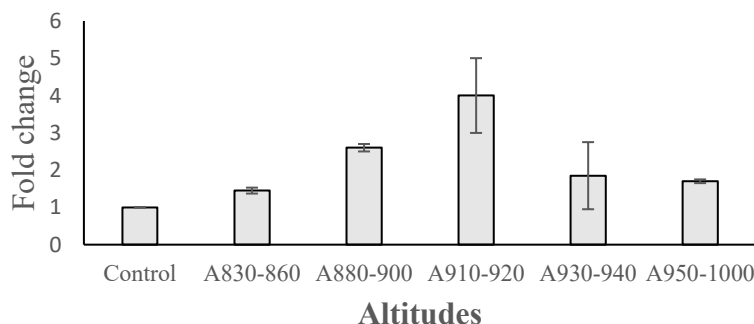
Myrosinase Gene



شکل ۵- مقایسه میزان تغییرات بیان ژن میروزیناز در نمونه های گیاه لگجی رویش یافته در ارتفاعات مختلف مناطق رادیواکتیو و میانگین بیان نسبی ژن در ناحیه غیر رادیواکتیو (Control). بالاترین میانگین تشعشعات بر اساس (جدول ۱) برای (ناحیه کنترل (A): ۰/۱۷ میلی سیورت، و برای ناحیه رادیواکتیو (B): ارتفاع ۸۳۰-۸۶۰: ۰/۵، ارتفاع ۸۸۰-۹۰۰: ۰/۶، ارتفاع ۹۲۰-۹۱۰: ۱/۱۵، ارتفاع ۹۳۰-۹۴۰: ۱/۱۸، ارتفاع ۹۵۰-۱۰۰۰: ۰/۶۵ میلی سیورت) بود.

Figure 5. Comparative analysis of Myrosinase gene expression alterations in *C. ovata* samples at different altitudes in the radioactive region and the non-radioactive region. According to Table 1, the highest mean radiation doses recorded were as follows: control area (A): 0.17 mSv; radioactive area (B): at 830–860 m altitude: 0.5 mSv, 880–900 m: 0.6 mSv, 910–920 m: 1.15 mSv, 930–940 m: 1.18 mSv, and 950–1000 m: 0.65 mSv.

TTG Gene



شکل ۶- مقایسه میزان تغییرات بیان ژن *TGG* در نمونه های گیاه لگجی در ارتفاعات مختلف ناحیه رادیواکتیو و میانگین بیان نسبی در ناحیه غیر رادیواکتیو (Control). بالاترین میانگین تشعشعات بر اساس (جدول ۱) برای (ناحیه کنترل (A): ۰/۱۷ میلی سیورت، و برای ناحیه رادیواکتیو (B): ارتفاع ۸۳۰-۸۶۰: ۰/۵، ارتفاع ۸۸۰-۹۰۰: ۰/۶، ارتفاع ۹۲۰-۹۱۰: ۱/۱۵، ارتفاع ۹۳۰-۹۴۰: ۱/۱۸، ارتفاع ۹۵۰-۱۰۰۰: ۰/۶۵ میلی سیورت) بود.

Figure 6. Comparative analysis of *TGG* gene expression alterations in *C. ovata* samples at different altitudes in the radioactive region and the non-radioactive region. According to Table 1, the highest mean radiation doses recorded were as follows: control area (A): 0.17 mSv; radioactive area (B): at 830–860 m altitude: 0.5 mSv, 880–900 m: 0.6 mSv, 910–920 m: 1.15 mSv, 930–940 m: 1.18 mSv, and 950–1000 m: 0.65 mSv.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج بررسی تغییرات بیان ژن میروزیناز (*Myrosinase*) در گیاه *Capparis ovata* در مواجهه با سطوح مختلف گاز رادون نشان داد که بیشترین میزان افزایش بیان ژن در بازه ارتفاعی ۹۲۰–۹۱۰ متر مشاهده گردید، به طوری که بیان ژن به بیش از ۷ برابر تیمار شاهد رسید. در این بازه، میانگین تغییر بیان ژن همراه با خطای استاندارد قلیل توجهی بود که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های فیزیولوژیک در پاسخ گیاهان مختلف به استرس باشد. در ارتفاعات ۹۴۰–۹۳۰ متر نیز افزایش قابل توجهی (حدود ۴ برابر) نسبت به شاهد مشاهده شد. اما در سایر ارتفاعات ۸۶۰–۸۳۰، ۹۰۰–۸۸۰، ۱۰۰۰–۹۵۰ متر (بیان ژن در حد پایین‌تری قرار داشت و در برخی موارد حتی کمتر از ۱/۵ برابر شاهد بود). این یافته‌ها نشان‌دهنده یک پاسخ غیر خطی و ارتفاع‌محور در بیان ژن میروزیناز می‌تواند باشد، به طوری که سطح بهینه تحریک در ارتفاعات میانی (۹۱۰–۹۲۰ متر) رخ داده است. بر اساس شکل ۵، الگوی بیان ژن *TGG* نیز تحت تأثیر بازه‌های مختلف ارتفاعی تغییراتی مشابه را نشان داد. بیشترین میزان بیان ژن *TGG* نیز در ارتفاع ۹۲۰–۹۱۰ متر ثبت شد (حدود

۴ برابر تیمار شاهد). در این بازه، خطای استاندارد نیز نسبتاً بالا بود که نشان‌دهنده تغییرپذیری پاسخ بین نمونه‌ها است. در ارتفاع ۹۰۰–۸۸۰ متر نیز افزایش معناداری نسبت به شاهد مشاهده شد (حدود ۲/۵ برابر)، در حالی که در ارتفاعات پایین‌تر (۸۶۰–۸۳۰) و بالاتر (۱۰۰۰–۹۵۰) میزان بیان به ترتیب حدود ۱/۵ و ۱/۸ برابر بود. کمترین بیان ژن نیز مانند ژن میروزیناز، در ارتفاع ۹۰۰–۸۸۰ متر مشاهده شد. هر دو ژن مورد بررسی *Myro* و *TGG* در شرایط مواجهه با سطوح مختلف رادون، الگوی مشابهی از افزایش بیان را در ارتفاعات میانی، به ویژه در بازه ۹۱۰–۹۲۰ متر نشان دادند. این موضوع می‌تواند ناشی از تحریک مسیرهای دفاعی گیاه در این بازه خاص از مواجهه با گاز رادون باشد. ژن‌های *Myro* و *TGG* نقش کلیدی در مسیرهای دفاعی ثانویه و سم‌زدایی دارند، و افزایش بیان آن‌ها می‌تواند بیانگر فعالیت شدیدتر سامانه‌های مقابله با تنش اکسیداتیو در شرایط خاص محیطی باشد. همچنین، تفاوت بین پاسخ ژنی در بازه‌های ارتفاعی مختلف می‌تواند به تفاوت در غلظت واقعی گاز رادون، شرایط زیست‌محیطی، میزان جذب و حساسیت بافت‌های گیاه وابسته باشد.

References

- Bhat, R., & Vyas, D. (2019). *Myrosinase*: insights on structural, catalytic, regulatory, and environmental interactions. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(4), 508-523. Doi:10.1080/07388551.2019.1576024
- Georgieva, M., & Vassileva, V. (2023). Stress management in plants: examining provisional and unique dose-dependent responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5105. Doi: 10.3390/ijms24065105
- Halkier, B. A., & Gershenzon, J. (2006). Biology and biochemistry of glucosinolates. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 303–333. DOI: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105228
- Hassanzadeh, M., Hosseinpour azad, N., & Zoulfagharpour, F. (2022). The Mutagenic Effects of Environmental Radon Gas Radiation on the Tanshinone Related Metabolites in *Artemisia Absinthium*. *Journal of Crop Breeding*. 14(41), 129-137. Doi:10.52547/jcb.14.41.129 [In Persian].
- Kordrostami, M., Sanjarian, F., Shahbazi, S., & Ghasemi-Soloklui, A. A. (2024). Exploring low-dose gamma radiation effects on monoterpene biosynthesis in *Thymus vulgaris*: insights into plant defense mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(22), 32842-32862. DOI: 10.1007/s11356-024-33269-y
- Kreuzer, M., Walsh, L., Schnelzer, M., Tschense, A., & Grosche, B. (2015). Radon and risk of death from cancer and non-malignant diseases: Extended follow-up of the German uranium miner's cohort study, 1946–2003. *British Journal of Cancer*, 113(9), 1362–1369. DOI: 10.1007/s00411-009-0249-5
- Kumar, S., Singh, A., & Sharma, R. (2017). *Myrosinase* gene family and regulation in Brassicales plants. *Plant Molecular Biology*, 95(3), 243–256. DOI: 10.1007/BF00019299
- Langebartels, C., Schraudner, M., Heller, W., Ernst, D., & Sandermann, H. (2002). Oxidative stress and defense reactions in plants exposed to air pollutants and UV-B radiation. *Oxidative Stress in Plants*, 105-135. DOI: Not Available
- Li, P., Zhang, R., & Zheng, G. (2018). Genetic and physiological effects of the natural radioactive gas radon on the epiphytic plant *Tillandsia brachycaulos*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 385-390. DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.09.029
- Maleki, M., Ghorbanpour, M., & Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. *Plant Gene*, 11, 247-254. DOI:10.1016/j.plgene.2017.04.006
- Mishra, S., Duarte, G. T., Horemans, N., Ruytinx, J., Gudkov, D., & Danchenko, M. (2024). Complexity of responses to ionizing radiation in plants, and the impact on interacting biotic factors. *Science of the Total Environment*, 171567. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.171567
- Özcan, M., & Akbulut, M. (2007). *Capparis ovata* var. herbacea: Chemical composition and antioxidant activity of its extracts. *Food Chemistry*, 104(3), 1071–1076. DOI:10.1080/10412905.2007.9699233
- Rahbarnejad, S., Asghari, A., Hosseinpour Azad, N., & Shokri, E. (2025). The Study of Farnesyl Diphosphate and Squalene Synthase Gene Expression Levels in *Artemisia absinthium* Exposed to Environmental Gamma Radiation. *Journal of Crop Breeding*, 17 (1), 117-128. DOI: 10.61186/jcb.17.1.117 [In Persian].

- Singh, N., & Sharma, P. (2018). Regulation of glucosinolate biosynthesis under abiotic stress. *Plant Science*, 270, 82–90. DOI: 10.1093/jxb/eraa479
- Singh, S., Fatima, A., Tiwari, S., & Prasad, S. M. (2020). Plant responses to radiation stress and its adaptive mechanisms. In *Plant life under changing environment* (pp. 105-122). Academic Press. DOI:10.1016/B978-0-12-818204-8.00006-0
- Wang, X., Li, Y., & Chen, J. (2019). Glucosinolate-Myrosinase system in plant defense and human health. *Phytochemistry Reviews*, 18(2), 421–435. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111786>
- Xie, L., Wang, Y., Zhang, Q., & Liu, H. (2020). Transcriptomic analysis reveals MAPK signaling and phosphocholine metabolism pathways are involved in radon-induced breast carcinogenesis. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 61(2), 172–183. DOI:10.1093/toxres/tfae161
- Yan, P. A., Xu, Y. Y., Zhu, X. W., Zhe, L. I. U., Gong, Y. Q., Liang, X. U., ... & Liu, L. W. (2014). Molecular characterization and expression profiles of *Myrosinase* gene (RsMyr2) in radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 13(9), 1877-1888. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60644-9
- Yuan, G., Wang, X., Guo, R., & Wang, Q. (2010). Effect of salt stress on phenolic compounds, glucosinolates, *Myrosinase* and antioxidant activity in radish sprouts. *Food Chemistry*, 121(4), 1014-1019. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.01.040
- Zhang, Q., & Li, M. (2018). Environmental radiation effects on plant secondary metabolism: a review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 130, 1–9. DOI:10.1016/B978-0-12-812689-9.00008-X.