

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Predictive and Diagnostic Modeling of Noise Exposure, Hearing Loss, and Systemic Health Impacts Using a Bayesian Network Model: A Case Study of Petrochemical Workers in the South Pars Region

Mohammadreza Heidarzadeh¹, Ardavan Farzinpour¹, Seyed Jafar Esmat Saatloo¹, Mohsen Omidvar^{2*}, Siamak Abbaspour², Akbar Rezaei², Ali Zeinabi², Sajad Zare³

¹Arya Sasol Polymer Company, Bushehr, Iran.

²Department of Health, Safety, and Environment (HSE), Faculty of HSEEM, Bushehr University of Medical Sciences, Bushehr, Iran.

³Department of Occupational Health, School of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran.

Received: 29-10-2025

Accepted: 20-4-2026

ABSTRACT

Introduction: Noise-Induced Hearing Loss (NIHL) is one of the major occupational health concerns. Prolonged exposure to high noise levels not only damages auditory function but also contributes to systemic physiological disorders. This study employed the dual predictive and diagnostic capabilities of a Bayesian Network (BN) to explore the complex interactions between causal factors of NIHL and the physiological outcomes of occupational noise exposure.

Material and Methods: In this cross-sectional study, medical and environmental records of 828 petrochemical workers were collected, including demographic, audiometric, noise, hematological, and biochemical variables. After preprocessing, an inferential BN model was developed using the Bayesian Search algorithm, enabling both Forward Inference (FI, predictive) and Backward Inference (BI, diagnostic) reasoning. Model performance was validated through Receiver Operating Characteristic (ROC) curve analysis and sensitivity testing.

Results: The FI results showed that exposure to SPL levels above 85 dB increased the risk of severe NIHL (warning level) from 9% to 57%. Also, the probability of systolic hypertension, the FBS above 100 mg/dL, and the total cholesterol above 200 mg/dL increased from 6% to 10%, 8% to 18%, 5% to 9% respectively. When multiple high-risk conditions (e.g., high SPL, long work experience, noisy units) were combined, the probability of severe NIHL exceeded 70%, accompanied by cumulative metabolic disturbances. BI results indicated that the presence of severe NIHL significantly increased the posterior probability of previous exposure to high or borderline SPL levels. Moreover, metabolic indices such as triglycerides (TG) and fasting blood sugar (FBS) showed positive associations with noise exposure, even below conventional action thresholds.

Conclusion: Bayesian networks provide a powerful framework for identifying and modeling direct and indirect probabilistic dependencies between occupational noise exposure and health outcomes in industrial environments. Their bidirectional inference ability (FI and BI) enhances predictive surveillance, early diagnosis, and the design of evidence-based preventive strategies in occupational health management.

Keywords: Noise-induced hearing loss, Bayesian network, Petrochemical, Cholesterol, Blood pressure, Predictive and diagnostic modeling.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Heidarzadeh M., Farzinpour A., Esmat Saatloo S.J., Omidvar M., Abbaspour S., Rezaei A., Zeinabi A., Zare S. Predictive and Diagnostic Modeling of Noise Exposure, Hearing Loss, and Systemic Health Impacts Using a Bayesian Network Model: A Case Study of Petrochemical Workers in the South Pars Region. *J Health Saf Work.* 2026; 16(1): 1-22.

* Corresponding Author Email: m.omidvar@bpums.ac.ir

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Noise pollution has emerged as a growing global concern mainly due to rapid industrialization, urbanization, and expanding transportation activities. Excessive sound exposure primarily affects the auditory system but also exerts systemic impacts on cardiovascular, metabolic, and psychological health. Noise-Induced Hearing Loss (NIHL) ranks as the second most common cause of hearing impairment following presbycusis, imposing a heavy socioeconomic and health burden worldwide. According to the Global Burden of Disease (GBD) 2019 report, approximately 1.57 billion people suffer from hearing loss, around 5% of the global population, with the majority being adult males over the age of 50. Occupational noise exposure remains the principal modifiable cause, accounting for about 7–21% of total hearing impairment cases globally.

Previous research has demonstrated that chronic exposure to high levels of industrial noise can provoke not only auditory damage but also systemic physiological changes such as elevated blood pressure, metabolic disorder, and biochemical stress responses. However, most prior studies have relied on conventional statistical methods incapable of capturing nonlinear, multi-factorial interactions between environmental, physiological, and demographic variables. Only a limited number of investigations have utilized Bayesian Networks (BNs) to model the causal and probabilistic mechanisms underpinning NIHL and its correlates in real workplace health datasets.

To address this research gap, the present study developed a comprehensive BN model using clinical, physiological, biochemical, and occupational noise exposure data from a petrochemical company in southern Iran. The model aimed to:

- (1) Identify causal dependencies between occupational noise, demographic factors, and health outcomes;
- (2) Quantify both direct and indirect effects of sound pressure levels (SPLs) on auditory and metabolic health; and
- (3) Enable dynamic risk assessment through forward and backward inference to support evidence-based occupational health management.

This project is regarded as one of the first large-scale, data-driven BN applications within the petrochemical industry that integrates noise, auditory, physiological, and biochemical markers simultaneously.

2. MATERIAL AND METHODS

Study Design and Data Collection

A cross-sectional study was conducted in 2025 within a major petrochemical complex in southern Iran. The dataset included 828 employees with complete occupational health records. Extracted features encompassed demographic characteristics (age, gender, smoking status, work experience, job unit), sound pressure levels (SPL) measured at different units, audiometric thresholds (at 500–8000 Hz), blood pressure parameters, and hematological and biochemical indices (fasting blood sugar, triglycerides, cholesterol, hematocrit, etc.).

Data Pre-Processing

Incomplete and irrelevant records were removed. Key predictive variables were selected based on prior scientific evidence and expert consultation. Continuous variables were discretized in the GeNIe BN software (version 5.0.R2) using clinically meaningful thresholds to enable probabilistic reasoning.

Structure Learning and Model Development

Initially, data-driven structure learning was conducted using the Bayesian Search algorithm in GeNIe, allowing automatic identification of conditional dependencies without predefined assumptions. Experts in occupational health and clinical medicine reviewed the automatically generated network and refined it to ensure interpretability, clinical relevance, and causal plausibility. This hybrid approach—combining data-driven discovery with expert-guided refinement—significantly improved the structural validity and generalizability of the final BN model.

Inference and Analysis Framework

Two core types of inferential analysis were implemented: (1) Forward Inference (FI/Direct reasoning): Used to predict or update the probability of outcomes (e.g., NIHL severity) given known causes such as SPL intensity or chemical exposure. (2) Backward Inference (BI/Reverse reasoning): Used to infer probable causes (e.g., high SPL exposure) based on observed effects such as severe hearing loss or metabolic abnormalities. This two-way reasoning functionality provided a foundation for Dynamic Risk Assessment (DRA), enabling both predictive and diagnostic evaluation.

Model Validation

Model precision, robustness, and discriminative power were validated through Receiver Operating Characteristic (ROC) curve analysis and sensitivity analysis. ROC analysis assessed the model's accuracy in classifying severe NIHL (level 3). Sensitivity analysis quantified the relative influence of each input variable on NIHL occurrence.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Descriptive Statistics

The mean age of participants was 42.1 ± 5.2 years, indicating a middle-aged workforce. Average height and weight were 176.5 cm and 84.6 kg, respectively, corresponding to a mean Body Mass Index (BMI) of 27.1, categorized as overweight by WHO standards. The average blood pressure (122/78 mm Hg) was clinically normal but exhibited moderate variability, suggesting possible subclinical cardiovascular stress. Audiometric data revealed an elevated threshold (~ 19 – 20 dB) at high frequencies (6000–8000 Hz) for both ears, indicative of early-stage NIHL. High standard deviations (e.g., SD = 15.7 dB at 8000 Hz) suggested substantial inter-individual differences in hearing impairment severity.

Forward Inference Analyses

In the unconditioned (prior) network, all nodes represented baseline probabilities for the general workforce. Upon conditioning the BN with high SPL (> 85 dB) as evidence, the model showed a significant increase in the likelihood of both auditory and systemic health abnormalities: Probability of severe NIHL (level 3): rose from 9% to over 70%. Probability of elevated blood pressure: level 2 increased from 32% to 45%; level 3 from 8% to 12%. Probability of high cholesterol: increased from 5% to 8%.

These results emphasized the synergistic effect of noise exposure combined with other occupational risk factors (long work duration and specific noisy units, e.g., unit D). The findings support existing evidence linking chronic industrial noise with not only auditory dysfunction but also secondary metabolic dysregulation, likely mediated through chronic stress pathways.

Backward Inference Analyses

Inverse reasoning provided valuable diagnostic insights. When NIHL level 3 was set as evidence, the estimated posterior probability of having worked

in conditions with SPL > 85 dB increased from 4% to 25%. Similarly, moderate noise exposure (80–85 dB) rose from 10% to 25%.

Another inverse analysis conditioned on metabolic abnormalities (elevated FBS > 110 mg/dL, triglycerides > 200 mg/dL, and borderline cholesterol 200–240 mg/dL). Under these constraints, the probability of high SPL exposure (> 85 dB) increased from 4% to 8%, while that of warning-level noise (80–85 dB) surged from 10% to 56%. These results suggest that chronic occupational noise may be associated with systemic metabolic stress beyond auditory pathways and that metabolic markers might serve as indirect indicators of cumulative noise exposure.

Sensitivity Analysis

Sensitivity results ranked the most influential factors affecting NIHL as (Mean Influence Coefficient): Work Unit = 0.195, SPL Level = 0.114, Work Experience = 0.090, Age = 0.080, Smoking = 0.060, Gender = 0.021, and Blood Pressure & BMI ≈ 0.010 . The work unit and noise intensity (SPL) were dominant predictors, followed by cumulative exposure duration and age. These results confirm the vital role of noise exposure in hearing deterioration and underline the need for targeted engineering and administrative controls in high-noise units.

Scenario-Based Simulation

Scenario simulations revealed that minor reductions in SPL yield substantial health benefits. For example, a 5 dB reduction in mean SPL across noisy units markedly decreased the joint risk of both auditory and non-auditory disorders. This finding supports proactive noise control interventions as part of integrated occupational health management strategies.

Model Performance

The ROC curve demonstrated strong discriminatory power for classifying severe hearing loss outcomes, confirming high model reliability. Together with sensitivity and scenario analyses, the model provided a robust framework for both prediction and causal diagnosis of occupational noise-related disorders.

4. CONCLUSIONS

This study demonstrated the effectiveness of Bayesian Networks in modeling complex

multi-factorial relationships among occupational noise exposure, auditory impairment (NIHL), and systemic physiological health indicators in industrial employees. The developed BN delivered both high predictive accuracy and interpretable causal insight, bridging empirical data and expert domain knowledge.

The dual inference capability — forward and backward reasoning — allowed the model to function as both a predictive engine for risk estimation and a diagnostic tool for identifying hidden exposure patterns. Forward inference confirmed that higher SPLs (>85 dB) significantly increase the risk of severe hearing loss and metabolic abnormalities such as elevated fasting glucose and lipid levels. Backward inference revealed that the presence of these effects could, in turn, trace back probable high exposure conditions even when noise records were unavailable or incomplete.

Sensitivity testing identified SPL level, work unit, experience, and age as the most influential factors for NIHL progression. The integrative simulation results indicated that relatively modest noise-control interventions (e.g., a 5 dB SPL reduction) can markedly lower the probability of both hearing and systemic health impairments.

The proposed BN framework thus supports a preventive and proactive strategy in occupational

health risk management, extending beyond hearing conservation to encompass broader physiological monitoring. This approach enables informed decision-making in industrial safety policy, aligns with dynamic risk assessment (DRA) principles, and emphasizes data-driven health surveillance under uncertainty.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors express their sincere appreciation to the Arya Sasol Polymer Company (ASPC) for financial sponsorship under contract number ASPC 403.2624.OP, and to Bushehr University of Medical Sciences (BPUMS) for their valuable scientific support throughout all stages of this study. Their collaboration and data access permissions were essential to the successful completion of this research.

6. ETHICAL CODE

IR.BPUMS.REC.1404.104

7. FUNDING

This study was fully funded by the Arya Sasol Polymer Company (ASPC) under research contract number 403.2624.OP. The funding organization had no influence on study design, data analysis, interpretation, or the manuscript preparation.

مدلسازی پیش‌نگر و تشخیصی مواجهه با سروصدا، کاهش شنوایی و پیامدهای سیستمیک سلامت با استفاده از مدل شبکه بیزی: مطالعه موردی در کارکنان یک پتروشیمی منطقه پارس جنوبی

محمد رضا حیدرزاده^۱، اردوان فرزین پور^۱، سید جعفر عصمت ساعتلو^۱، محسن امیدوار^{۲*}، سیامک عباس پور^۱، اکبر رضایی^۱، علی زینبی^۱، سجاد زارع^۳

^۱شرکت پلیمر آریاساسول، بوشهر، ایران.

^۲گروه ایمنی، بهداشت و محیط زیست، دانشکده HSEEM، دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، بوشهر، ایران.

^۳گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۳۱

چکیده

مقدمه: کاهش شنوایی ناشی از صدا (NIHL) یکی از نگرانی‌های اساسی در حوزه سلامت شغلی است. قرارگیری طولانی‌مدت در معرض صدا، نه تنها موجب آسیب شنوایی شده بلکه باعث ایجاد سایر عوارض فیزیولوژیکی سیستمیک نیز می‌شود. در این پژوهش، از دو توانمندی پیش‌بینی و تشخیصی شبکه بیزی (BN) جهت بررسی تعاملات پیچیده بین علل بروز NIHL و پیامدهای مواجهه با سروصدا استفاده شد.

روش کار: در این مطالعه مقطعی، داده‌های ۸۲۸ کارگر پتروشیمی (شامل اطلاعات دموگرافیک، شنوایی‌سنجی، صداسنجی، شاخص‌های هماتولوژیک و بیوشیمیایی) از سوابق پزشکی و اندازه‌گیری‌های محیط کار استخراج گردیده و پیش‌پردازش شدند. در مرحله بعد، مدل استنتاجی شبکه بیزی با استفاده از الگوریتم Bayesian Search ساخته شد که امکان استنتاج رو به جلو (FI، پیش‌بینی) و استنتاج معکوس (BI، تشخیصی) را فراهم کرد. برای ارزیابی اعتبار مدل از منحنی‌های ROC و تحلیل حساسیت استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج FI نشان داد که مواجهه با تراز SPL بالاتر از ۸۵ دسی‌بل، خطر بروز NIHL شدید (سطح هشدار) را از ۰.۹٪ به ۵.۷٪، احتمال فشار خون سیستولیک بالا، قند خون ناشتا بالاتر از ۱۰۰ mg/dL و کلسترول تام بالاتر از ۲۰۰ mg/dL را به ترتیب از ۰.۶٪ به ۱۰٪، از ۰.۸٪ به ۱.۸٪، از ۰.۵٪ به ۰.۹٪ افزایش می‌دهد. با ایجاد شاهد همزمان برای شرایطی نظیر SPL بالا، سابقه کار بالا و اشتغال در واحدهای پرصدا، احتمال NIHL شدید به بیش از ۷۰٪ افزایش یافت که با خطرات تجمعی متابولیک نیز همراه بود. BI نشان داد که مشاهده NIHL شدید، احتمال مواجهه پیشین با SPL بالا یا مرزی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. افزون بر آن، شاخص‌های متابولیکی مانند TG و FBS با احتمال مواجهه با صدا (حتی در ترازهای پایین‌تر از حدود اقدام) ارتباط مثبت نشان دادند.

نتیجه‌گیری: شبکه‌های بیزی چارچوبی قدرتمند برای شناسایی و مدلسازی وابستگی‌های احتمالی مستقیم و غیرمستقیم بین مواجهه شغلی با سروصدا و پیامدهای سلامت در محیط‌های صنعتی فراهم می‌کنند. توانایی BN در استنتاج BI و FI، تشخیص پیش‌بینانه، پایش سلامت، و طراحی راهبردهای پیشگیرانه هدفمند را در مدیریت سلامت شغلی تقویت می‌کند.

کلمات کلیدی: اِفت شنوایی ناشی از سروصدا، شبکه بیزی، پتروشیمی، کلسترول، فشار خون، مدلسازی پیش‌بین و تشخیصی.

مقدمه

آلودگی صوتی به یکی از نگرانی‌های روبه‌رشد جهانی تبدیل شده است، که عمدتاً ناشی از روندهایی نظیر صنعتی‌شدن، شهرنشینی و افزایش حمل‌ونقل می‌باشد (۱). صدای بیش از حد، در وهله‌ی نخست، سیستم شنوایی را تحت‌تأثیر قرار داده و موجب کاهش شنوایی موقت یا دائم می‌شود (۳). علاوه بر این، بر عملکرد سیستم قلبی-عروقی، فشار خون، تغییرات فیزیولوژیک، تحریک‌پذیری، اختلالات هیجانی نظیر خشم، و برهم خوردن الگوی خواب نیز اثر می‌گذارد (۱، ۴). این آسیب ممکن است یک یا هر دو گوش را درگیر کرده و حالت موقتی یا دائمی داشته باشد (۴). NIHL دومین علت شایع کاهش شنوایی پس از پیرگوشی (presbycusis) است و بار اقتصادی قابل توجهی بر فرد و نظام سلامت وارد می‌کند (۵). در ایالات متحده نزدیک به ۳۰ میلیون نفر، و در ایران بیش از ۲ میلیون نفر در معرض سطوح مضر صدا قرار دارند (۱). گزارش بار جهانی بیماری‌ها (GBD) نشان می‌دهد حدود ۱/۵۷ میلیارد نفر در جهان دچار افت شنوایی هستند که عمدتاً (در حدود ۶۲٪) در سنین بالای ۵۰ سال قرار دارند (۶). حدود ۵٪ جمعیت جهان از NIHL رنج می‌برند که بیشتر شامل مردان بزرگسال است (۷). مرور نظام‌مند مطالعات نشان می‌دهد مواجهه شغلی با صدا عامل ۷ تا ۲۱ درصد موارد کاهش شنوایی است (۸). در مالزی، ۲۶/۹٪ از کارگران صنعتی دچار تغییر آستانه شنوایی و ۲۱/۶٪ مبتلا به NIHL تأیید شده می‌باشند (۹).

عوامل خطر متعددی در بروز NIHL نقش دارند؛ از جمله مواجهه مزمن با صداهای شغلی یا تفریحی، افزایش سن، استعمال دخانیات، و مواجهه هم‌زمان با مواد اتوتوکسیک نظیر فلزات سنگین و حلال‌ها (۴). صدا به عنوان یک عامل استرس‌زای غیراختصاصی، چندین ارگان از بدن را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. هرچند رابطه علی بین صدا و بیماری‌های قلبی-عروقی همچنان مورد بحث است (۱۱)، لیکن، برخی از پژوهش‌ها مواجهه شغلی با صدا را با فشار خون بالا و تغییر در شاخص‌های فیزیولوژیکی مانند فشار خون، کلسترول، تری‌گلیسرید و

قند خون ناشتا مرتبط می‌دانند (۱).

این یافته‌ها، بر آثار سیستمیک صدای مزمن و نیاز به ارزیابی تلفیقی ریسک تأکید دارند. مواجهه طولانی‌مدت با صدا موجب برهم خوردن تعادل هموستاتیک شده و بار آلوستاتیک را افزایش می‌دهد که به‌نوبه خود شاخص‌های متابولیک و قلبی-عروقی نظیر فشار خون، چربی‌ها، لزجت خون و غلظت گلوکز را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱۲). در مطالعه مقطعی «اسمیعی و همکاران» بر روی تکنسین‌های مرد ایرانی، عواملی مانند سن، مدت زمان مواجهه، فشار خون سیستمیک (SBP)، قند خون ناشتا (FBS)، کلسترول (Chol)، هموگلوبین (Hb)، پلاکت‌ها و هماتوکریت به‌عنوان شاخص‌های مؤثر بر NIHL شناسایی شدند (۱).

صنایع نفت، گاز و پتروشیمی از جمله محیط‌هایی هستند که کارگران در آن در معرض تراز بالای صدا قرار دارند. این صداها عمدتاً ناشی از کمپرسورها، مولدها و موتورهای صنعتی هستند (۱۳). در مطالعه‌ای در مجتمع پتروشیمی Eleme، تعداد ۱۰۸ منبع صوتی شناسایی شد که به چهار دسته تقسیم شدند: کمپرسورها (۶٪)، دفاتر (۱۰٪)، پمپ‌ها (۳۷٪) و فن‌های خنک‌کننده‌ی هوا (۴۷٪) (۱۴). داده‌های پالایشگاه Kaduna نشان دادند که صداهای عملیاتی اغلب از ۹۰ دسی‌بل فراتر رفته؛ صدای تخلیه بخار به ۱۴۱/۱ dB، کمپرسورها به ۱۳۷/۸ dB و اتاق توربین‌ها به‌طور میانگین به ۹۳/۱ dB با پیک ۱۲۶/۸ dB می‌رسند (سطوحی که برای شنوایی، بهره‌وری و ایمنی بسیار خطرناک‌اند) (۱۵).

با وجود مقررات و راهکارهای پیشگیرانه‌ی موجود، NIHL غالباً دیر تشخیص داده شده و به‌طور ناکافی کنترل می‌گردد. این امر ضرورت استفاده از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی را برای پیش‌بینی بروز و شناسایی عوامل خطر ساز، آشکار می‌سازد (۱۶، ۱۷). مدل‌سازی اثرات پیچیده‌ی NIHL نیازمند چارچوبی است که بتواند ماهیت چندعاملی و غیرقطعی مواجهه شغلی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی را درک کند (۳). روش‌های آماری سنتی نظیر رگرسیون یا تحلیل هم‌بستگی اغلب بر روابط

داده‌های ناقص یا سوابق مواجهه نامطمئن در سلامت شغلی اهمیت ویژه‌ای دارد. در مقابل، شبکه‌های بیزی با فراهم‌سازی استنتاج دوسویه (پیش‌بین و تشخیصی)، این محدودیت اساسی را برطرف کرده و چارچوبی مناسب برای ارزیابی پویا، تشخیص زودهنگام و مدیریت مبتنی بر شواهد ریسک‌های ناشی از سروصدای شغلی ارائه می‌دهند. تنها تعداد محدودی از پژوهش‌ها از داده‌های واقعی سلامت شغلی برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده بهره برده‌اند که اثرات مستقیم و غیرمستقیم صدا در محیط‌های صنعتی را توأماً در نظر بگیرد. چندین پژوهش از BNs برای بررسی تأثیر صدا بر سلامت استفاده کرده‌اند. Barrero و همکاران از BN برای پیش‌بینی کاهش شنوایی در کارگران با تحلیل نوع فعالیت، سابقه کاری و سطح سروصدا استفاده کردند و عوامل کلیدی خطر را شناسایی نمودند (۱۸). Chen و همکاران از مدل بیزی سن-دوره-گروه (Bayesian Age-Period-Cohort) برای پیش‌بینی سال‌های از دست‌رفته به دلیل ناتوانی (DALYs) ناشی از NIHL در چین بهره بردند و افزایش این شاخص از ۲/۴۱ میلیون در سال ۲۰۲۰ به ۲/۶۶ میلیون در سال ۲۰۳۰ را پیش‌بینی کردند (۲۲). Fahmi Hussin و همکاران با بهینه‌سازی بیزی (Bayesian Optimization) دقت مدل SVM در تشخیص NIHL را بهبود دادند (۱۷). همچنین Asghari و همکاران یک مدل BN برای پیش‌بینی آزار صوتی (Noise Annoyance) توسعه دادند که در آن استرس، حساسیت به صدا و ویژگی‌های شخصیتی عوامل اصلی پیش‌بینی‌کننده شناخته شدند (۱۶).

هرچند شبکه‌های بیزی در مدل‌سازی ریسک پتانسیل بالایی دارند، لیکن کاربرد آن‌ها در زمینه NIHL در صنایع پرریسکی مانند پتروشیمی هنوز اندک است. بر اساس بررسی‌های محققان، این مطالعه نخستین پژوهشی است که یک مدل BN را با استفاده از داده‌های جامع پزشکی، محیطی و دموگرافیک استخراج‌شده از یک مجتمع پتروشیمی به‌کار گرفته است. در این تحقیق، نقش عوامل موثر بر NIHL و اثرات ترکیبی آن‌ها و هم‌چنین تأثیر صدای محیط کار بر متغیرهای فیزیولوژیک

خطی متکی هستند و نمی‌توانند وابستگی‌های غیرخطی و پیچیده میان متغیرهای مرتبط با NIHL را به‌درستی نشان دهند (۱۲، ۱۸).

این در حالیست که، شبکه‌های بیزی (BNs) مزیت چشمگیری دارند؛ زیرا از توانایی ترکیب استدلال احتمالاتی به همراه نمایش گرافیکی برخوردار هستند. به‌عنوان نوعی از مدل گرافیکی احتمالاتی، BN قادر است روابط علی مستقیم و غیرمستقیم میان متغیرها را (حتی با وجود داده‌های ناقص یا غیرقطعی) مدل‌سازی کند. این ویژگی در تحقیقات سلامت شغلی بسیار بارز است، زیرا داده‌ها در این حوزه معمولاً ناهمگن و دارای نواقص ثبت هستند (۳، ۱۶، ۱۹). افزون بر آن، BNs امکان استنتاج پیش‌بین و تشخیصی^۱ را فراهم می‌سازند؛ به‌گونه‌ای که هم می‌توان احتمال بروز NIHL را تحت سناریوهای مختلف مواجهه برآورد کرد و هم از روی نتیجه مشاهده‌شده (NIHL)، نقش عوامل خطر احتمالی را بازشناسایی نمود (۲۰). این قابلیت دوسویه، باعث برتری BNs در مقایسه با شیوه‌های سنتی برتر می‌شود؛ به‌ویژه هنگامی که هدف، پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و برنامه‌ریزی پیشگیرانه در محیط‌های صنعتی پیچیده باشد (۱۷، ۱۹). به‌طور خلاصه، BN چارچوبی قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی ریسک NIHL فراهم می‌آورد که دانش متخصصان، داده‌های واقعی و استنتاج احتمالاتی را در یک ساختار منسجم ادغام می‌کند.

با وجود پژوهش‌های متعدد پیرامون سروصدای شغلی و پیامدهای آن، اکثر مطالعات از روش‌های آماری سنتی مانند رگرسیون‌های کلاسیک استفاده کرده‌اند که ذاتاً به استنتاج رو به جلو (Forward Inference) محدود بوده و صرفاً قادر به پیش‌بینی پیامدها بر اساس مواجهه‌های از پیش تعریف‌شده هستند. این روش‌ها از نظر ساختاری امکان استنتاج تشخیصی (Diagnostic or Backward Reasoning)، یعنی حرکت از پیامدهای مشاهده‌شده (مانند NIHL شدید یا اختلالات متابولیک) به سمت علل محتمل مواجهه شغلی را ندارند؛ قابلیت‌هایی که در شرایط

1. Predictive and Diagnostic Inferences

می شوند. بر اساس نتایج این مقایسه، سطح شنوایی افراد در طبقات ۱، ۲ یا ۳ قرار می گیرد که به ترتیب شامل توانایی شنوایی قابل قبول (در محدوده طبیعی)، اختلال شنوایی خفیف (سطح هشدار) و شنوایی ضعیف (سطح ارجاع) می شود.

یادگیری ساختاری و ایجاد مدل

جهت بررسی ارتباطات بین متغیرها، ابتدا فرایند یادگیری ساختاری برای شناسایی وابستگی‌های احتمالاتی و روابط بین متغیرهای مطالعه به صورت داده‌محور (بر اساس داده‌های موجود) و بدون اعمال ساختار شبکه از پیش تعریف شده با استفاده از الگوریتم Bayesian Search در نرم‌افزار GeNIe به کار رفت. الگوریتم یادگیری ساختار با استفاده از تابع امتیازدهی BDeu اجرا شد که یکی از توابع استاندارد و پذیرفته شده برای داده‌های گسسته در شبکه‌های بی‌زی است. با توجه به پیچیدگی و چندبعدی بودن مجموعه داده، این رویکرد امکان ساخت بی‌طرفانه و عینی شبکه بی‌زی را فراهم کرد. پس از مرحله آموزش اولیه، کارشناسان حوزه بهداشت شغلی و پزشکی ساختار شبکه را یک بازنگری محدود کرده و اصلاحات لازم جهت افزایش معناداری و تفسیرپذیری روابط استنتاج شده اعمال نمودند. هدف از این بازنگری، نه بهینه‌سازی نتایج، بلکه جلوگیری از روابط ساختاری غیرقابل توجیه از نظر علمی بود. به طور مشخص، بازنگری خبرگان شامل: (۱) حذف تعداد محدودی از یال‌ها با جهت‌گیری زیستی نامحتمل (برای مثال یال‌هایی که پیامدهای بالینی را به عنوان علت متغیرهای مواجهه‌ای مدل می‌کردند)، و (۲) اعمال قیود جهت‌دار مبتنی بر دانش پیشین در برخی روابط بنیادین (مانند جهت اثر SPL به سمت NIHL و یا اثر تجربه کاری بر روی افت فرکانسی) بود که این موضوع در حوزه BN معمول است. هیچ یال جدیدی خارج از روابط پیشنهاد شده توسط الگوریتم به شبکه اضافه نشد و ساختار نهایی همچنان ریشه در یادگیری داده‌محور داشت. این رویکرد ترکیبی (یادگیری داده‌محور و بازنگری مبتنی بر نظر متخصصان) دقت و کاربرد عملی

و بیوشیمیایی با استفاده از BN مورد بررسی قرار گرفت. با تکیه بر قابلیت‌های استدلال احتمالاتی و علی BNs، این پژوهش ابزاری عملی برای مدیریت ریسک سروصدای شغلی در محیط‌های صنعتی پیچیده ارائه می‌کند.

روش کار

جمع‌آوری اطلاعات

این مطالعه مقطعی در سال ۱۴۰۴ در یک شرکت پتروشیمی در ایران انجام شد. اطلاعات مربوط به ۸۲۸ نفر از کارکنان مورد مطالعه قرار گرفته و داده‌ها از پرونده‌های سلامت شغلی آن‌ها استخراج شد. متغیرهای استخراج شده شامل داده‌های جمعیت‌شناختی، سطح فشار صوت (SPL)، آستانه‌های ادیومتری (۵۰۰ تا ۸۰۰۰ هرتز)، فشار خون، شاخص‌های هماتولوژیک و شاخص‌های بیوشیمیایی بود.

پیش‌پردازش داده‌ها

برای ساخت شبکه بی‌زی، اطلاعات ناقص، حذف شده (در مجموع، ۷ مورد (کمتر از ۱٪ داده‌ها)) و متغیرهای کلیدی بر اساس منابع علمی و نظر متخصصان انتخاب گردیدند. داده‌های پیوسته با نرم‌افزار GeNIe (نسخه v5.0.R2) و بر اساس آستانه‌های بالینی معتبر و از پیش تعریف شده استخراج شده از دستورالعمل‌ها و اجماع‌های پزشکی (۲۶-۲۳) و بهداشت شغلی گسسته‌سازی شدند (جدول ضمیمه ۱). این آستانه‌ها به صورت غیرداده‌محور و با هدف حفظ تفسیرپذیری بالینی و تضمین بازتولیدپذیری مدل انتخاب شده‌اند. در ارتباط با سطوح افت شنوایی از دستورالعمل مؤسسه HSE (Health and Safety Executive) انگلستان استفاده شد (۲۷). بر اساس این دستورالعمل، تراز شنوایی به دست آمده در ادیومتری افراد در فرکانسهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۶ کیلوهرتز با هم جمع شده و مقدار مجموع را برای هر گوش جداگانه بدست می‌آید. مقادیر بدست آمده با مقادیر ارائه شده در جدول (تصحیح سن و جنسیت) با دو شاخص سطح هشدار (Warning level) و سطح ارجاع (Referral level) مقایسه

تعمیم‌پذیری و پایداری مدل‌های پیش‌بینی شبکه‌های بیزی (BNs)، به‌ویژه هنگام استنتاج علی، ضروری است. برای اطمینان از دقت پیش‌بینی و وضوح ساختاری، از تحلیل منحنی ROC و ارزیابی حساسیت استفاده شد. منحنی ROC برای بررسی توان تمایز مدل در طبقه‌بندی پیامدهایی مانند کاهش شنوایی شدید (سطح ۳) به کار رفت، در حالی که تحلیل حساسیت، متغیرهای ورودی کلیدی مؤثر بر پیامدها را شناسایی کرد. این رویکرد ترکیبی باعث افزایش اعتبار پیش‌بینی مدل و درک بهتر ساختار علی شده و در نتیجه به سیاست‌گذاری هدفمند در سلامت شغلی کمک می‌کند.

یافته‌ها

آمار توصیفی متغیرهای به‌کاررفته در مدل‌سازی شبکه جدول ۱ آمار توصیفی متغیرهای کلیدی جمعیت‌شناختی، فیزیولوژیکی، ادیومتری و بیوشیمیایی استفاده‌شده در مدل BN را نشان می‌دهد. این مجموعه داده شامل اطلاعات ۸۲۸ نفر از کارکنان بوده و طیف گسترده‌ای از شاخص‌های سلامت مرتبط با مواجهه شغلی با صدا را منعکس می‌کند.

تحلیل آماری توزیع SPL در واحدهای کاری

تحلیل آماری دقیقی جهت بررسی توزیع سطح فشار صوت (SPL) اندازه‌گیری‌شده در واحدهای مختلف مجتمع انجام گرفت. شکل ۱ نمودار جعبه‌ای (باکس پلات) اندازه‌گیری‌های SPL و آمار توصیفی متناظر را ارائه می‌دهد.

ساختار پایه و استنتاج اولیه شبکه بیزی

شکل ۲، ساختار پایه شبکه بیزی آموزش داده شده را پیش از اعمال هرگونه شاهد نشان می‌دهد. در این مرحله، تمام متغیرها، توزیع احتمال حاشیه‌ای/پیشین خود را براساس داده‌های اولیه و بدون اعمال شاهد نمایش می‌دهند. هر گره (متغیر)، روند کلی در میان جامعه‌ی کارکنان را نشان می‌دهد (بدون تمرکز بر سناریوی خاصی از مواجهه). به دلیل

مدل نهایی را ارتقاء می‌دهد. هم‌چنین برای جلوگیری از بیش‌برازش ساختاری و تولید وابستگی‌های فاقد معنا، مجموعه‌ای از محدودیت‌های منطقی و زیستی اعمال شد: (۱) محدودیت حداکثر تعداد والدها برای هر گره، به‌منظور کنترل پیچیدگی شبکه (۲) ممنوعیت یال‌های زیستی یا زمانی نامحتمل (نظیر پیامدهای شنوایی ← سن یا سابقه کاری) (۳) رعایت تقدم منطقی متغیرها (متغیرهای جمعیت‌شناختی و مواجهه‌ای در لایه‌های بالادست نسبت به پیامدهای شنوایی و متابولیک). لازم به ذکر است که این محدودیت‌ها صرفاً ماهیت حذفی داشته و هیچ یال جدیدی به ساختار به‌صورت دستی اضافه نشده است. پس از نهایی‌شدن ساختار شبکه بیزی، تخمین پارامترهای شبکه (جدول احتمال شرطی) با استفاده از الگوریتم EM طبق پیاده‌سازی پیش‌فرض نرم‌افزار (GeNIe v5.0.R2) انجام شد. این الگوریتم امکان برآورد پایدار پارامترها را حتی در حضور داده‌های ناقص یا فراوانی‌های کم فراهم می‌کند. با توجه به ماهیت مقطعی مطالعه، جهت یال‌ها به‌عنوان وابستگی‌های احتمالی سازگار با فرضیات علی تفسیر شده‌اند و از استنباط علیت قطعی اجتناب گردیده است.

استنتاج و تحلیل

پس از ساخت شبکه، دو نوع تحلیل استنتاجی انجام شد: (۱) استنتاج مستقیم (FI یا تشخیصی) جهت پیش‌بینی اثر مشاهده‌شده بر پایه علل شناخته‌شده (مثلاً احتمال NIHL با دانستن احتمال مواجهه با صدا، مواد شیمیایی، مصرف دارو و...) (۲) استنتاج معکوس (BI یا پیش‌بینی) جهت بازسازی یا پیش‌بینی علل ممکن از روی نتایج یا علائم مشاهده‌شده (مثلاً احتمال مواجهه با صدا در صورت دانستن بروز NIHL سطح ۳). این استدلال دوطرفه امکان تشخیص پیش‌بینانه و نیز ارزیابی پویای ریسک (DRA) را فراهم می‌کند.

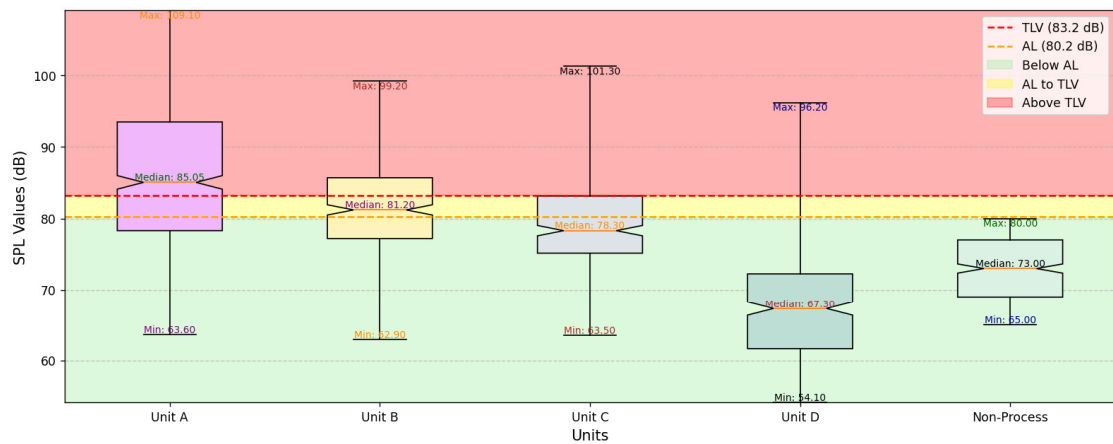
اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل برای اطمینان از قابلیت اعتماد،

جدول ۱: پروفایل توصیفی متغیرهای ورودی

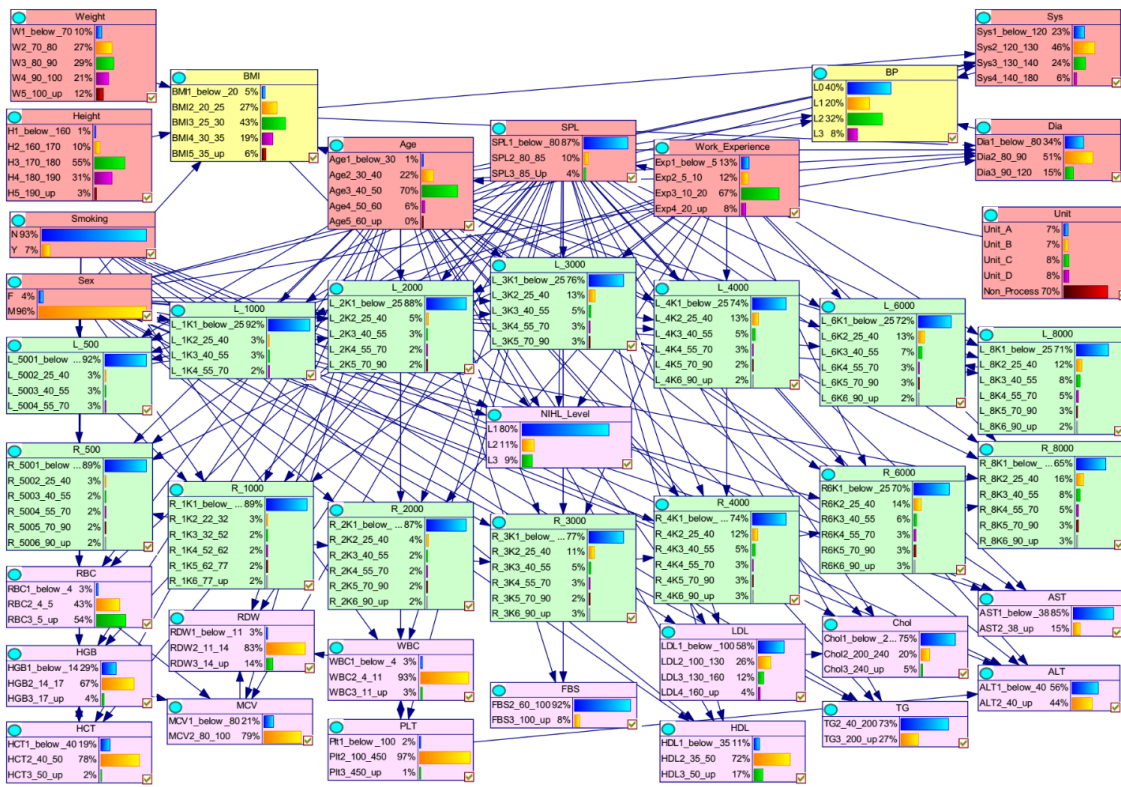
StdDev	Mean	Max	Min	
۵.۲	۴۲.۱	۶۱	۲۵	سن (سال)
۶.۶	۱۷۶.۵	۱۹۸	۱۵۱	قد (Cm)
۱۳.۲	۸۴.۶	۱۴۱	۵۰	وزن (Kg)
۳.۵	۲۷.۱	۴۱.۴	۱۶.۷	BMI
۹.۸	۱۲۲	۱۶۰	۸۰	Sys. (mmHg.)
۷.۴	۷۸.۵	۱۱۲	۵۰	Dia. (mmHg.)
۶.۲	۱۱.۲	۹۵	۵	R-500 (Hz)
۶.۸	۱۱.۵	۹۵	۵	R-1000 (Hz)
۸	۱۲.۱	۹۵	۵	R-2000 (Hz)
۱۲.۲	۱۶.۳	۹۵	۵	R-3000 (Hz)
۱۲.۹	۱۷.۵	۹۵	۵	R-4000 (Hz)
۱۴.۶	۱۸.۹	۱۰۰	۵	R-6000 (Hz)
۱۵.۷	۲۰	۹۵	۰	R-8000 (Hz)
۴.۵	۱۱	۶۵	۵	L-500 (Hz)
۵.۴	۱۱.۴	۶۰	۰	L-1000 (Hz)
۶.۴	۱۲	۷۰	۵	L-2000 (Hz)
۱۱.۴	۱۶.۷	۸۵	۵	L-3000 (Hz)
۱۱.۸	۱۷.۸	۹۰	۱۰	L-4000 (Hz)
۱۳.۷	۱۸.۹	۹۰	۵	L-6000 (Hz)
۱۵.۹	۱۹.۸	۹۵	۵	L-8000 (Hz)
۲.۱	۶.۸	۴۶.۲	۳.۲	WBC
۰.۵	۵.۱	۷.۳۹	۳.۴	RBC
۱.۳	۱۴.۵	۱۸.۲	۹.۵	HGB
۳.۱	۴۲.۵	۵۲.۶	۳۰.۱	HCT
۷	۸۴.۳	۹۹.۳	۵۷.۳	MCV
۵۰.۵	۲۱۵.۳	۵۸۹	۴۶	PLT
۱.۱	۱۳.۴	۲۰.۹	۱۰.۹	RDW
۱۲.۹	۸۷	۲۴۰	۶۰	FBS
۳۴.۹	۱۷۰.۱	۳۱۴	۱۱۰	Chol
۸۲.۱	۱۶۷.۶	۸۱۱	۵۰	TG
۶.۳	۴۲.۸	۶۲	۳۰	HDL
۳۰.۸	۹۵.۸	۲۰۸	۵۰	LDL
۱۶.۹	۳۰.۳	۴۱۳	۱۱	AST
R500-8000: آستانه شنوایی گوش راست				
L500-8000: آستانه شنوایی گوش چپ				

مدلسازی پیش‌نگر و تشخیصی مواجهه با سروصدا..

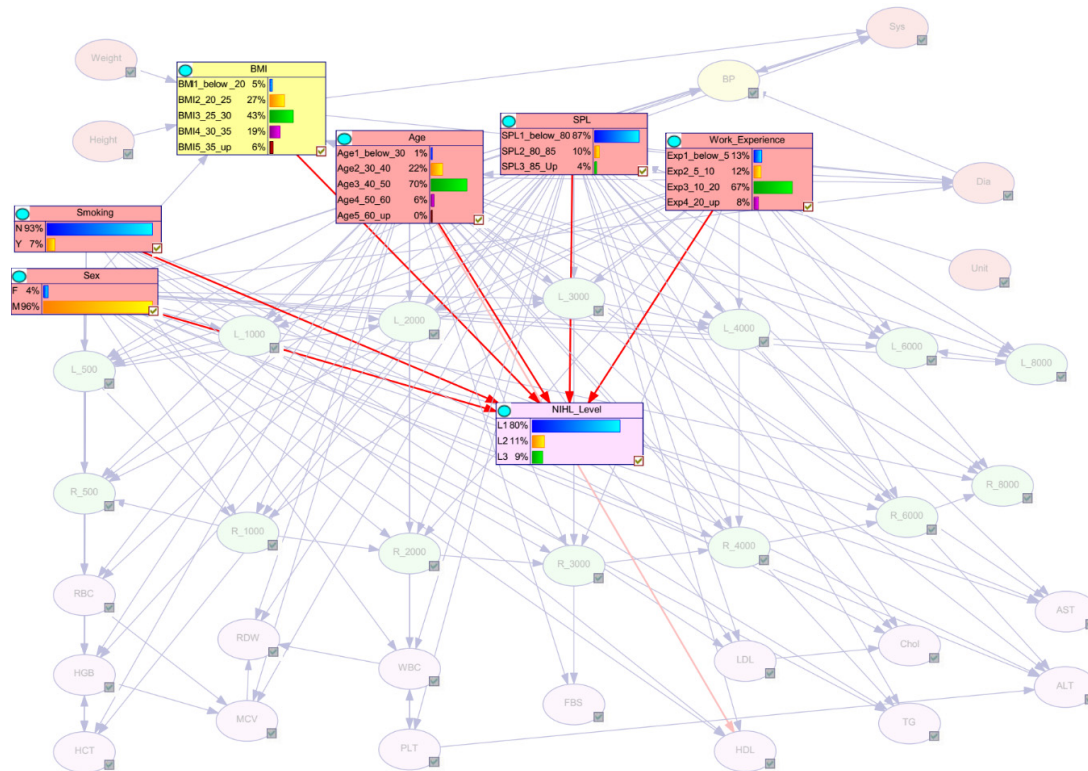


units	Min	Q1	Median	Q3	Max	Mean(Log)	Std Dev	% Above TLV	% Below AL	% AL < x < TLV
Unit A	63.60	78.30	85.05	93.50	109.10	95.34	10.31	54.59%	31.33%	14.08%
Unit B	62.90	77.20	81.20	85.70	99.20	86.08	6.82	36.78%	42.82%	20.40%
Unit C	63.50	75.15	78.30	83.15	101.30	84.28	6.87	24.75%	59.87%	15.38%
Unit D	54.10	61.65	67.30	72.25	96.20	80.29	8.47	6.35%	89.84%	3.81%
Non-Process	65.00	69.00	73.00	77.00	80.00	74.93	4.67	0.00%	100.00%	0.00%

شکل ۱: تحلیل توصیفی SPL در شرکت مورد بررسی



شکل ۲: ساختار پایه (اولیه) شبکه آموزش داده شده قبل از اعمال شاهد



شکل ۳: پوشش مارکوف متغیرهای موثر بر NIHL

سناریوهای پیش‌بینی چندمتغیره در BN مدل‌سازی شدند. با اعمال همزمان SPL بالا ($< 85 \text{ dB}$)، سابقه کاری طولانی (< 20 سال) و اشتغال در واحدهای پرسروصد (مانند واحد D)، بعنوان شاهد، احتمال بروز کاهش شنوایی شدید ناشی از صدا (سطح NIHL سطح L3) از مقدار پایه ۹٪ به بیش از ۷۰٪ افزایش یافت. در همین سناریو، احتمال افزایش فشار خون (سطح L2 از ۳۲٪ به ۴۵٪ و سطح L3 از ۸٪ به ۱۲٪) و افزایش کلسترول (از ۵٪ به ۸٪) نیز بالا رفت، که بیانگر اثر تقویتی عوامل شغلی همزمان است.

تحلیل‌های استنتاج معکوس و تشخیصی

برآورد مواجهه با صدا بر اساس بروز NIHL شدید

به منظور تخمین احتمال مواجهه‌ی قبلی در کارکنانی که دچار کاهش شنوایی شدید بودند، استنتاجی معکوس انجام شد که طی آن، NIHL سطح L3 به عنوان شاهد در

تعدد روابط نمایش داده شده در شکل ۲ و به منظور نمایش واضح تر ارتباطات در شبکه، پوشش مارکوف (Markov Blanket) متغیرهای موثر بر NIHL به صورت مشخص و واضح تر در شکل ۳ نمایش داده شده است.

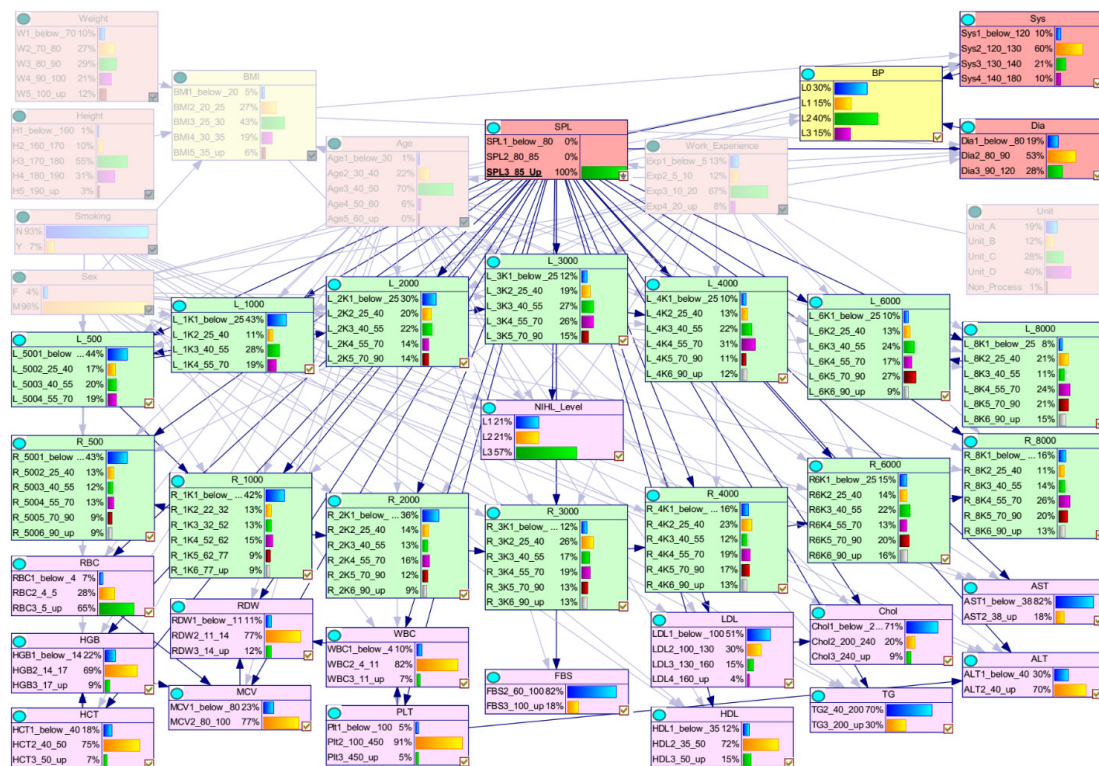
تحلیل‌های استنتاج علی و پیش‌بینانه

بررسی اثر مجزای SPL بر متغیرهای پایین‌دستی در شبکه BN

به‌منظور بررسی پیامدهای سلامتی ناشی از صدا، سطح SPL بالا (سطح L3) بعنوان شاهد قرار گرفته و تأثیرات آن بر متغیرهای شنوایی و فیزیولوژیکی در شبکه رهگیری شد. تغییرات حاصله در احتمال متغیرها، در بخش بحث با ارجاع به شکل ۳ ارائه گردیده است.

سناریوهای چندمتغیره‌ی پیش‌بینی ریسک

برای درک نحوه‌ی تأثیر ترکیبی چند عامل خطر،



شکل ۴: استدلال روبه عقب از SPL بالا (L3) به سمت پیامدهای شنوایی سنجی

آن است که مواجهه‌ی مزمن با صدا می‌تواند با مسیرهای استرسی فیزیولوژیکی فراتر از سامانه‌ی شنوایی مرتبط باشد و بعضی الگوهای متابولیک ممکن است به‌عنوان نشانگرهای غیرمستقیم بار سروصدای محیط کار عمل نمایند. البته بایستی تاکید شود که این یافته‌ها نباید به‌عنوان شواهد علی تعبیر شوند، بلکه نشان‌دهنده الگوهای وابستگی احتمالی‌اند که می‌توانند در کنار سایر اطلاعات شغلی، برای رهگیری مواجهه‌های تجمعی گذشته مورد استفاده قرار گیرند.

شبیه‌سازی اثر مداخلات کنترلی سروصدا

جهت برآورد اثر بالقوه‌ی مداخلات مهندسی یا اداری کاهش صدا، سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در محیط BN مورد بررسی قرار گرفتند. با تغییر وضعیت SPL از $85\text{dB} <$ به 80dB (وضعیت ایده‌آل پس از کنترل سروصدا)، احتمال بروز NIHL شدید (سطح ۳) از ۴۴٪

شبکه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد احتمال فعالیت در محیط‌های با $\text{SPL} > 85\text{dB}$ از ۴٪ به ۲۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین احتمال مواجهه با تراز متوسط صدا (۸۵-۸۰ dB) از ۱۰٪ به ۲۵٪ رسید.

رهگیری مواجهه احتمالی با صدا بر اساس شاخص‌های متابولیک بالا

یک تحلیل معکوس نیز به‌منظور بررسی ارتباط احتمالی میان افزایش شاخص‌های متابولیک و مواجهه با صدای شغلی انجام شد. با شرط‌گذاری شبکه (ایجاد شاهد) بر روی افزایش قند خون ناشتا ($\text{FBS} > 110\text{mg/dL}$)، تری‌گلیسرید بالا ($< 200\text{mg/dL}$) و کلسترول مرزی ($200-240\text{mg/dL}$)، احتمال مواجهه‌ی پیشین با $\text{SPL} > 85\text{dB}$ از ۴٪ به ۸٪ افزایش یافت، در حالی که احتمال قرارگرفتن در محدوده‌ی ۸۵-۸۰ dB (سطح هشدار استاندارد) از ۱۰٪ به ۵۶٪ رسید. این نتایج بیانگر

جدول ۲: ماتریس درهم ریختگی طبقه بندی سطوح مختلف NIHL

		پیش بینی شده			دقت
		^(۱) L1	^(۱) L2	^(۱) L3	
					NIHL_Level = 0.94444 (782/828)
شنوایی	L1	۶۶۱	۲۵	۱۱	L1 = 0.94835 (661/697)
	L2	۳	۸۲	۲	L2 = 0.94253 (82/87)
	L3	۲	۳	۳۹	L3 = 0.886362 (39/44)

(۱) مقادیر L1 تا L3 بر اساس طبقه بندی مؤسسه HSE بریتانیا تعیین شده اند [۲۷]

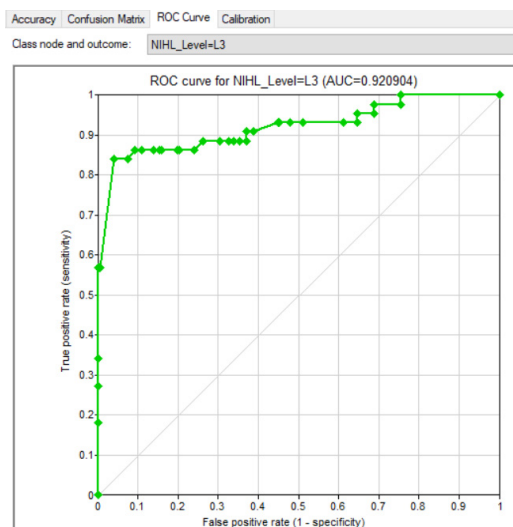
L1 (سطح ۱): شنوایی طبیعی یا قابل قبول؛ مجموع آستانه ها پایین تر از سطح هشدار استاندارد
 L2 (سطح ۲): کاهش خفیف شنوایی؛ مجموع آستانه ها بین سطوح هشدار و ارجاع.
 L3 (سطح ۳): کاهش شدید شنوایی؛ مجموع آستانه ها برابر یا بالاتر از سطح ارجاع

(۲). از آنجایی که تعداد موارد کاهش شنوایی شدید (L3) در مقایسه با موارد سالم (L1) کمتر است (۳۹ مورد در برابر ۶۶۱ مورد) و در چنین شرایطی، اتکا به معیار دقت کلی (Accuracy) به تنهایی می تواند گمراه کننده باشد. بر همین اساس، علاوه بر Accuracy کلی مدل (۹۴٫۴٪)، عملکرد طبقه بندی به صورت کلاس محور و به ویژه برای کلاس L3 مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق ماتریس درهم ریختگی جدول ۲، از مجموع ۴۴ مورد واقعی L3، تعداد ۳۹ مورد به درستی شناسایی شده اند که معادل حساسیت (Sensitivity) برابر ۰٫۸۸۶ برای تشخیص L3 است. همچنین، مدل در تمایز افراد غیر L3 عملکرد بسیار بالایی نشان داد؛ به طوری که از ۷۸۴ مورد غیر شدید، تنها ۱۳ مورد به اشتباه به عنوان L3 پیش بینی شده اند که نشان دهنده ویژگی (Specificity) برابر ۰٫۹۸۳ برای کلاس L3 است. با توجه به نامتوازن بودن کلاس ها، عملکرد متوازن مدل، با استفاده از F1-Score نیز بررسی شد. بر اساس مقادیر حساسیت و ویژگی، مقدار F1-Score کلاس L3 برابر با ۰٫۸۱ به دست آمد که بیانگر توان قابل قبول مدل در شناسایی موارد کاهش شنوایی شدید، علی رغم شیوع پایین این کلاس، است. با توجه به اهداف بهداشت حرفه ای، تأکید اصلی ارزیابی مدل بر حساسیت و F1-Score برای کاهش شنوایی شدید ناشی از صدا بوده است، زیرا عدم شناسایی این موارد می تواند پیامدهای شغلی، درمانی و پیشگیرانه جدی تری نسبت به خطای مثبت کاذب ایجاد کند.

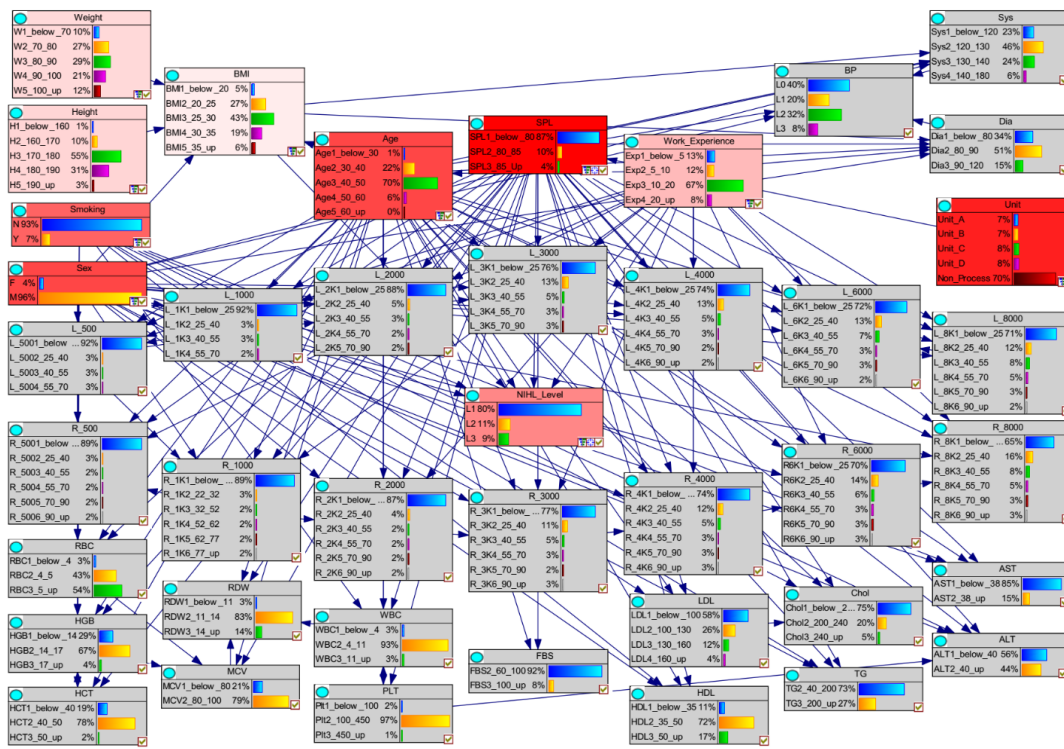
به ۹٪ کاهش یافت. به طور هم زمان شاخص های سلامت سیستمیک نظیر قند خون (FBS) و کلسترول نیز کاهش نشان دادند (FBS از ۱۸٪ به ۶٪ و کلسترول از ۹٪ به ۴٪). این شبیه سازی مداخله ای، سودمندی شبکه های بیزی را در پیش بینی اثرات مداخلات پیشگیرانه و برنامه ریزی مبتنی بر شواهد در ایمنی شغلی برجسته می کند.

ارزیابی عملکرد مدل: ROC و تحلیل حساسیت

عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC و تحلیل حساسیت ارزیابی شد تا از دقت پیش بینی و شفافیت ساختاری اطمینان حاصل گردد. جهت جلوگیری از بیش برآزش و حفظ اعتبار استنباط های مدل، ارزیابی عملکرد شبکه بیزی مبتنی بر اعتبارسنجی متقابل (cross-validation) انجام شد. به طور مشخص، مجموعه داده به صورت (k-fold cross-validation) $k=10$ تقسیم شد؛ به گونه ای که در هر تکرار، مدل شبکه بیزی بر روی $k-1$ زیرمجموعه آموزش داده شد و عملکرد آن بر روی بخش نگه داشته شده (out-of-fold) ارزیابی گردید. منحنی ROC نشان داد که سطح زیر منحنی (AUC) برابر با ۰٫۹۲۰ (شکل ۴) است که قدرت بالای مدل را در تفکیک بین موارد پرخطر و کم خطر NIHL نشان می دهد. تحلیل بیشتر، با استفاده از ماتریس درهم ریختگی (Confusion Matrix) دقت بالای شبکه در طبقه بندی تراز شدت NIHL را نشان داد: سطح ۱: ۹۴٫۸٪، سطح ۲: ۹۴٫۳٪، سطح ۳: ۸۸٫۶٪، با دقت کلی ۹۴٫۴٪ (جدول



شکل ۵: منحنی ROC و AUC ناشی از NIHL سطح ۳



شکل ۶: خروجی گرافیکی آنالیز حساسیت

جداول تحلیل حساسیت، "واحد کاری" (میانگین تأثیر ۰,۱۹۵) به‌عنوان پیش‌بین اصلی شناخته شد، پس از آن SPL (۰,۱۱۴) ، سابقه کار (۰,۰۹) ، سن (۰,۰۸) ، سیگار (۰,۰۶) ، جنسیت (۰,۰۲۱) ، و فشارخون و BMI (هر کدام

در تحلیل حساسیت نیز تأثیرگذارترین متغیرها بر خروجی گره NIHL مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۵). با انتخاب متغیر سطح NIHL به‌عنوان گره هدف، تغییرات حاشیه‌ای در گره‌های ورودی تحلیل گردید. بر اساس

≈ ۰,۰۱) قرار داشتند. در شکل ۵ گره‌های با رنگ قرمز بیشترین تأثیر را دارند. این یافته‌ها نقش کلیدی مواجهه با صدا و تنش‌های فیزیولوژیکی مرتبط را برجسته کرده و کاربرد شبکه بیزی در تشخیص زودهنگام و طراحی مداخلات هدفمند سلامت شغلی را تأیید می‌کنند.

بحث

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، میانگین سن شرکت‌کنندگان، ۴۲.۱ سال با انحراف معیار ۵.۲ بود، که بیانگر گروهی میان‌سال است. میانگین قد و وزن به ترتیب ۱۷۶.۵ سانتی‌متر و ۸۴.۶ کیلوگرم بود که منجر به شاخص توده بدنی (BMI) برابر با ۲۷.۱ (SD=3.5) شد، که مطابق با استانداردهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) نشان‌دهنده‌ی وضعیت اضافه‌وزن است (۲۸).

میانگین فشار خون سیستولیک و دیاستولیک (mmHg 122.0/78.5) در محدوده‌ی طبیعی بالینی بود، هرچند تغییرپذیری نسبتاً متوسطی نشان می‌داد که احتمال ریسک قلبی-عروقی تحت‌بالینی (Subclinical) را مطرح می‌کند. داده‌های ادیومتری، افزایش آستانه‌های شنوایی را در فرکانس‌های بالا نمایان کردند، به‌گونه‌ای که میانگین مقادیر در ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ هرتز حدود ۱۹ تا ۲۰ دسی‌بل در هر دو گوش بود. این مقادیر بالا در فرکانس‌های بالا، نشانه‌های اولیه از کاهش شنوایی در فرکانس‌های بالا را نشان می‌دهند، که از ویژگی‌های بارز کاهش شنوایی ناشی از صدا (NIHL) است (۴). انحراف معیارها نیز در آستانه‌های فرکانس بالا نسبتاً زیاد بودند (مانند SD=15.7 در R-8000 Hz)، که نشانگر تفاوت بین‌فردی زیاد و وجود افراد با آسیب شدیدتر در جامعه‌ی مورد بررسی است.

شاخص‌های هماتولوژیک میانگین مقادیر طبیعی را در پارامترهای HCT، WBC، RBC، HGB و نشان دادند. میانگین هموگلوبین (g/dL 14.5) و هماتوکریت (۴۲,۵٪) در محدوده‌ی طبیعی بالینی قرار داشت. شمارش پلاکت‌ها با میانگین $215,3 \times 10^3/\mu\text{L}$ و دامنه‌ی وسیع

تغییرپذیری، تنوع التهابی یا خونی را بین افراد پیشنهاد می‌کند. میانگین FBS برابر با ۸۷,۰ mg/dL، کلاسترول ۱۷۰,۱ mg/dL و تری‌گلیسریدها با میانگین و انحراف معیار بالا (SD=82.1، max=811 mg/dL) نوسان زیادی نشان دادند که احتمال دیس‌لیپیدمی (اختلالات چربی خون) را مطرح می‌سازد. سطوح HDL و LDL عموماً در دامنه‌های مطلوب قرار داشتند. میانگین آنزیم AST برابر با ۳,۳ U/L بود، هرچند مقادیر بالا در برخی افراد حاکی از فشار متابولیک یا کبدی احتمالی بود (۲۹، ۳۰).

مطابق با شکل ۱، ارزیابی‌های SPL نشان داد که خطر سروصدای قابل‌توجهی در برخی واحدهای عملیاتی (به‌ویژه در واحدهای A و B) وجود دارد و بخش قابل ملاحظه‌ای از اندازه‌گیری‌ها از حدود مجاز مواجهه شغلی فراتر می‌رود. در مقابل، مناطق غیرفرآیندی معمولاً تراز صدای قابل‌قبول تری داشتند. واحدهای A و B به‌عنوان نواحی بحرانی مواجهه با صدا شناخته شدند که در آن‌ها بیش از یک‌سوم اندازه‌گیری‌ها از حدود مجاز سروصدا فراتر رفت. واحدهای C و D ایمن‌تر بودند، اما همچنان نواحی موضعی با سروصدا بالا داشتند که نیازمند پایش دوره‌ای هستند. این تراز بالای SPL با بروز NIHL ارتباط مستقیم دارند.

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که توزیع سطوح NIHL به‌صورت نسبتاً گسترده (بر اساس احتمال‌های پیشین) پخش شده است، به‌طوری که حدود ۹٪ از کارکنان در سطح شدید (L3) قرار داشته‌اند (که نشان‌دهنده‌ی وجود یک زیرگروه پرریسک حتی پیش از اعمال شواهد است) (۳۱). سطح کلاسترول (>200 mg/dL) و تری‌گلیسرید (>200 mg/dL) بالا به ترتیب در ۲۷٪ و ۲۵٪ جمعیت مشاهده شد، در حالی که ۸٪ دارای FBS بالا بودند. احتمال بروز پرفشاری خون سیستولیک (>140 mmHg) بالا برابر ۸٪ و افزایش ALT (>40 U/L) در حدود ۴۴٪ از کارکنان شایع بود. این توزیع‌ها هرچند در محدوده‌ی مورد انتظار بالینی هستند، اما نشانگر حضور قابل توجه ریسک‌فاکتورهای تحت‌بالینی بوده و کاربرد BN در شناسایی آسیب‌پذیری‌های سلامت نهفته را پیش از ورود

پارامترهای متابولیک همچون کلسترول و تری‌گلیسرید نیز حساسیت قابل توجهی نسبت به سروصدا نشان دادند. احتمال کلسترول بالاتر از ۲۰۰ mg/dL از ۵٪ به ۹٪ و تری‌گلیسرید بالا از ۲۷٪ به ۳۰٪ افزایش یافت. علاوه بر این، درصد موارد ALT > 40 U/L (نشانگر آسیب یا استرس کبدی) از ۴۴٪ به ۷۰٪ افزایش یافت، که می‌تواند بیانگر تأثیرات مزمن سروصدا بر عملکرد کبدی باشد. هرچند این تغییرات ثانویه، کمتر از تغییرات شنوایی بودند، اما هم‌جهتی آن‌ها فرضیه‌ی تأثیر چندسامانه‌ای سروصدا بر بدن انسان را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که مواجهه‌ی شغلی با صدا می‌تواند بار آلوستاتیک (Allostatic Load) را در بدن بالا ببرد. این پاسخ شبکه بیزی، توانایی استنتاج بیزی در شناسایی ریسک‌های مستقیم و غیرمستقیم سلامت ناشی از مواجهات محیطی را نشان می‌دهد و به کارایی آن در ارزیابی‌های پیش‌بینی‌کننده در محیط‌های صنعتی اشاره دارد. در همین راستا، محمدی و همکاران در مطالعه‌ی روی کارکنان کارخانه‌ی عایق‌سازی در ایران دریافتند که بین گروه‌های مواجه و غیرمواجه با سروصدا، تفاوت معناداری در میانگین گلوکز و کلسترول خون وجود دارد و به‌ویژه روند افزایشی کلسترول مشاهده شد (۳۳).

در ادامه‌ی تحلیل‌ها، پس از وارد کردن SPL بالا به‌عنوان شاهد، احتمال پسین $SBP > 140 \text{ mmHg}$ از ۶٪ به ۱۰٪ افزایش یافت که بیانگر ارتباط مستقیم بین مواجهه با سروصدا شغلی و پاسخ پرفشاری خون است. علاوه بر این، هنگامی که SBP به‌عنوان متغیر شرطی دوم همراه با SPL وارد مدل شد، احتمال برخی شاخص‌های سیستمیک مانند FBS بالا (از ۱۸٪ به ۲۵٪) و کلسترول بالا (از ۹٪ به ۱۴٪) نیز مجدد افزایش نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که SBP نه‌تنها پیامد مستقلاً از مواجهه با سروصدا است، بلکه می‌تواند به‌عنوان میانجی‌ای عمل کند که بار فیزیولوژیکی را در سیستم‌های متابولیک تشدید می‌کند؛ این موضوع مفهوم سروصدا به‌عنوان استرسور چندسامانه‌ای (Multi-system stressor) را در محیط‌های صنعتی تقویت می‌کند.

هرگونه شواهد مواجهه‌ای تأیید می‌کنند.

با وارد کردن SPL بالا به‌عنوان شاهد (شکل ۳)، شبکه بیزی تغییرات گسترده‌ای در توزیع‌های احتمالی پسین تعدادی از شاخص‌های سلامت، به‌ویژه شاخص‌های مربوط به شنوایی، قلبی‌عروقی و متابولیک، نشان داد. بزرگ‌ترین تغییر در متغیر "سطح NIHL" رخ داد، به‌طوری‌که احتمال بروز کاهش شنوایی شدید (L3) از ۹٪ به ۵۷٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی تأثیر علی قوی مواجهه با صدای شغلی است (۴، ۷، ۳۲). این افزایش حدود شش‌برابری نقش بحرانی SPL را به‌عنوان محرک اصلی و مستقیم NIHL برجسته می‌کند. افزایش‌های متوسط نیز در احتمال فشار خون بالا (سطوح L2 و L3) مشاهده شد- از ۳۲ و ۸٪ به ۴۰ و ۱۵٪- و همچنین در احتمال قند خون ناشتا $100 < \text{mg/dL}$ که از ۸٪ به ۱۸٪ رسید. علاوه بر این، شاخص‌های خونی تغییرات معناداری نشان دادند (RBC از ۵۷٪ به ۷۲٪، HGB از ۱۸٪ به ۳۱٪، HCT از ۲۱٪ به ۲۵٪، WBC از ۶٪ به ۱۷٪، و PLT از ۳٪ به ۱۰٪). این تغییرات پیشنهاد می‌کنند که مواجهه با سروصدا ممکن است تنش فیزیولوژیکی سیستمیک ایجاد کند که فراتر از اثرات موضعی آن بر سامانه‌ی شنوایی است (۱). لازم به تأکید است که افزایش فشار خون یا قند خون شاخص‌های غیراختصاصی بالینی هستند و نباید به‌طور فردی به مواجهه با سروصدا نسبت داده شوند. اهمیت این یافته‌ها عمدتاً در غربالگری جمعیتی و پایش سلامت شغلی است، نه تشخیص بالینی فردمحور. این یافته نباید باعث شود پزشکان طب کار، هر فشار خون بالایی را به صدا ربط دهند و از سایر علل غافل شوند. ارزش این یافته در "غربالگری گروهی" است نه "تشخیص فردی". این نتایج با مطالعه‌ی تجربی محمدی و همکاران (۳۳) در مورد اثرات فیزیولوژیکی مواجهه با سروصدا هم‌خوانی دارد؛ یافته‌های آنان نشان داد که سروصدا موجب افزایش معنادار در RBC، WBC، HGB و HCT می‌شود، در حالی که هم‌زمان باعث کاهش MCV، MCH و MCHC می‌گردد، که نشانگر تغییرات استرسی در شاخص‌های هماتولوژیک ناشی از آلودگی صوتی است.

پیشگیرانه‌ی هدفمند بر پایه‌ی نقش و الگوی مواجهه را تأکید می‌کند. مطابق بخش ۳.۵.۱، احتمال مواجهه با صداهای میانی (80-85 dB) از ۱۰٪ به ۲۵٪ افزایش می‌یابد. گرچه این محدوده پایین‌تر از آستانه‌های قانونی (۸۵ دسی بل) برای مداخلات حفاظتی اجباری است، اما مطابق با سطوح هشدار (Action Levels) در بسیاری از استانداردهای بهداشت شغلی بوده و بیانگر آن است که مواجهه‌ی طولانی‌مدت در این دامنه نیز می‌تواند خطر شنوایی‌زا باشد و نیاز به اقدامات پیشگیرانه دارد (الزام اجرای برنامه HCP از سطح 82dB) (۳۶).

در صنایع پیچیده‌ای مانند پتروشیمی، مواجهه واقعی کارکنان حاصل برهم‌کنش هم‌زمان سروصدا، مواد شیمیایی، شرایط فیزیکی محیط کار و رفتارهای حفاظتی است. عدم لحاظ برخی از این مؤلفه‌ها می‌تواند به برآورد محافظه‌کارانه یا بیش‌برآورد برخی مسیرهای شبکه بیزی منجر شود. توسعه مدل‌های BN آینده که این عوامل را به‌صورت گره‌های مستقل یا تعدیل‌گر لحاظ کنند، می‌تواند قدرت تصمیم‌سازی و دقت سیاست‌گذاری بهداشت حرفه‌ای را به‌طور معناداری ارتقا دهد.

در پایان بایستی یادآوری گردد که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مطالعه ماهیت مداخله‌ای واقعی نداشته و مبتنی بر استنتاج شرطی در شبکه بیزی هستند. در این سناریوها، با تغییر وضعیت گره SPL از $85 \text{ dB} <$ به $80 >$ dB، توزیع‌های احتمالی پسین سایر متغیرها محاسبه شدند. بنابراین، کاهش احتمال NIHL شدید و تغییرات مشاهده‌شده در برخی شاخص‌های متابولیک باید به‌عنوان نتیجه سناریوهای مدل‌محور تفسیر شوند و نه پیامد مستقیم یک مداخله کنترل سروصدا در دنیای واقعی.

محدودیت‌ها و مسیرهای آینده

با وجود ارزیابی جامع مواجهه با سروصدا و تأثیرات فیزیولوژیکی و شنوایی آن بر اساس سوابق سلامت شغلی، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است. به‌رغم جذابیت بالینی نتایج سناریوهای شبیه‌سازی‌شده، باید توجه داشت که این تحلیل‌ها مبتنی بر داده‌های مقطعی و

همان‌طور که در ساختار شبکه بیزی ارائه‌شده نشان داده شده است، BMI به‌صورت یک گره مستقل در مدل شبکه بیزی وارد شده و در کنار متغیرهای جمعیت‌شناختی و شغلی، در ساختار وابستگی‌های شرطی شبکه لحاظ گردیده است. بدین ترتیب، استنتاج‌های مربوط به مواجهه با صدا و پیامدهای فیزیولوژیک، به‌طور ضمنی و شرطی بر وضعیت BMI انجام شده‌اند و اثر آن به‌عنوان یک مخدوشگر بالقوه تا حدی در چارچوب مدل BN کنترل شده است. با این حال، باید تأکید کرد که شبکه بیزی در این مطالعه، وابستگی‌های احتمالی و روابط شرطی بین متغیرها را مدل‌سازی می‌کند و هدف آن ارائه‌ی شواهد احتمالاتی و غیرعقلی قطعی است. بنابراین، اگرچه BMI در ساختار مدل حضور دارد، نمی‌توان به‌طور کامل احتمال تأثیر عوامل مرتبط با سبک زندگی، نظیر الگوی تغذیه یا سطح فعالیت بدنی، را به‌عنوان توضیح‌های جایگزین برای بخشی از تغییرات متابولیک مشاهده‌شده منتفی دانست. بنابراین، مطالعات آینده با وارد کردن شاخص‌های دقیق‌تر سبک زندگی و طراحی‌های طولی، می‌توانند در تفکیک بهتر اثرات مستقل سروصدا از عوامل مخدوشگر مانند چاقی نقش مؤثری ایفا کنند.

مطالعه‌ی Kuang و همکاران (۳۴) نیز ارتباط معناداری بین کاهش شنوایی دوطرفه در فرکانس‌های بالا و افزایش فشار خون یافتند و نشان دادند که کارگران مواجهه با سروصدا شغلی در معرض ریسک بالاتر پرفشاری خون هستند. همچنین، Miao و همکاران (۳۵) در بررسی سوابق سلامت شغلی کارگران، شیوع NIHL و ارتباط آن با پرفشاری خون را تحلیل کردند و دریافتند که مواجهه با سروصدا، ریسک هر دو اختلال — شنوایی و قلبی‌عروقی — را افزایش می‌دهد.

تحلیل‌های چندمتغیره ارزش استدلال بیزی در بهداشت صنعتی را برجسته می‌کند، جایی که استرسورهای محیطی مانند سروصدا با عوامل سازمانی از قبیل واحد کاری، نقش شغلی و سابقه‌ی خدمت برهم‌کنش دارند. این نتایج، اهمیت رویکردهای ارزیابی ریسک یکپارچه برای شناسایی گروه‌های پرخطر و اجرای استراتژی‌های

تفسیر شوند و نه شواهد قطعی علیت. تحلیل روبه جلو تأیید کرد که مواجهه با سطوح SPL بالاتر از 85dB به‌طور معنی‌داری احتمال بروز افت شنوایی شدید (سطح ۳) و نیز ناهنجاری‌های شاخص‌های متابولیک (مانند افزایش قند و چربی خون) را افزایش می‌دهد. این امر نشانگر اثر سیستمیک سروصدا مزمن بر سلامت عمومی بدن است. در عین حال، تحلیل روبه عقب نقش مهمی در شناسایی الگوهای محتمل مواجهه داشت که با پیامدهای نامطلوب سلامت مرتبط بودند. در نظر گرفتن همزمان وقوع افت شنوایی شدید یا افزایش قند خون ناشتا و کلسترول به عنوان شاهد، ریشه در مواجهه پیشین با SPL بالا یا مرزی داشت، حتی در شرایطی که علائم شنوایی آشکار وجود نداشت. این یافته‌ها، توان بالقوه‌ی مدل‌سازی بیزی را نه‌فقط در پیش‌بینی ریسک‌های سلامت، بلکه در بازسازی تاریخچه‌ی مواجهه‌های پنهان و آشکارسازی تهدیدهای خاموش سلامت در محیط‌های پر سروصدا برجسته می‌سازند. علاوه بر این، تحلیل حساسیت و سناریوها نشان دادند که SPL، واحد کاری، سابقه‌ی خدمت و سن بیشترین تأثیر را بر پیشرفت NIHL دارند. شبیه‌سازی سناریوهای مداخله‌ای نشان داد که کاهش تنها ۵ دسی‌بل از SPL می‌تواند احتمال بروز هر دو نوع اختلال (شنوایی و غیرشنوایی) را به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین بیاورد. چنین کاهش‌هایی در عمل، بیشتر از طریق راهکارهای مدیریتی و کنترلی قابل اجرا هستند؛ به‌ویژه استفاده‌ی مؤثر از وسایل حفاظت فردی شنوایی (HPDs) همراه با آموزش صحیح، تناسب (fit) مناسب، و پایش تبعیت کارکنان، که می‌تواند کاهش مؤثر ۵ دسی‌بل یا بیشتر در تراز دریافتی گوش را بدون نیاز به تغییرات اساسی در منبع صدا فراهم کند. این نتایج از یک رویکرد یکپارچه و پیش‌نگر در مدیریت سروصدای شغلی حمایت می‌کنند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که کارگران مواجهه با ترازهای بالای صدای شغلی، علاوه بر پیامدهای شنوایی، ممکن است در معرض الگوهای نامطلوب متابولیک و قلبی-عروقی نیز قرار گیرند. از این‌رو، معاینات ادواری این گروه شغلی نباید صرفاً به ادیومتری محدود شود و

ساختار آموخته‌شده شبکه بیزی هستند. بنابراین، ارتباط بین کاهش SPL و بهبود شاخص‌های متابولیک می‌تواند تحت تأثیر محدودش‌گرهایی نظیر تفاوت‌های واحد کاری، الگوهای فعالیت فیزیکی، چاقی یا ویژگی‌های شغلی هم‌بسته با سروصدا قرار گرفته باشد. برای تأیید اثر واقعی مداخلات کاهش سروصدا بر پیامدهای غیرشنوایی، انجام مطالعات طولی یا مداخله‌ای با طراحی مناسب ضروری است. انتخاب متغیرها به داده‌های موجود محدود بود، که ممکن است برخی عوامل خطر مرتبط با NIHL را نادیده گرفته باشد. افزون بر این، اثرات گسترده‌تر سیستمیک سروصدا مانند پیامدهای روانی یا عصبی به دلیل محدودیت نوع داده‌ها در این مدل پوشش داده نشدند. با این حال، مدل شبکه‌ی بیزی که بر داده‌های واقعی کاربردی شده است، بینش‌های تفسیرپذیر و مبتنی بر شواهد ارائه می‌دهد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده متغیرهای اضافی و پیگیری‌های طولی را برای ارتقای دقت و کارایی مدل لحاظ کنند. هم‌چنین، پیشنهاد می‌گردد که مطالعات آینده با طراحی‌های طولی یا مداخله‌ای، و با ثبت دقیق استفاده از HPD، مواجهه با مواد اتوتوکسیک و عوامل سازمانی، شبکه‌های بیزی غنی‌تری با قدرت استنباط بالاتر توسعه دهند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه، کارایی شبکه‌های بیزی (BNs) را در مدل‌سازی روابط چندعاملی بین مواجهه با سروصدای شغلی، کاهش شنوایی ناشی از صدا (NIHL) و شاخص‌های فیزیولوژیکی سلامت در میان کارکنان مجتمع‌های پتروشیمی برجسته ساخت. مدل شبکه بیزی نه‌تنها دقت پیش‌بینی بالایی را در طبقه‌بندی شدت کاهش شنوایی نشان داد، بلکه از طریق استنتاج روبه جلو و روبه عقب (FI & BI)، وابستگی‌های احتمالی قوی ارزشمندی را در زمینه‌ی مکانیسم‌های اثر ارائه کرد. هرچند ساختار جهت‌دار شبکه بیزی امکان استنتاج‌هایی سازگار با فرضیات علی را فراهم می‌کند، اما با توجه به ماهیت مقطعی داده‌ها، نتایج باید به‌عنوان وابستگی‌های احتمالی

بهداشت و ایمنی صنعتی کمک کند.

تشریح و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب قدردانی صمیمانه‌ی خود را از شرکت پلیمر آریا ساسول (ASPC) به دلیل حمایت مالی از این پژوهش (شماره قرارداد: ASPC 403.2624) ابراز می‌دارند. همچنین از دانشگاه علوم پزشکی بوشهر (BPUMS) به خاطر پشتیبانی ارزنده علمی در مراحل مختلف این مطالعه با کد اخلاق IR.BPUMS.REC.1404.104 قدردانی می‌شود.

توجه به پروفایل متابولیک و قلبی-عروقی آنان، در قالب مراقبت‌های بهداشتی شغلی، باید نسبت به سایر کارگران از اولویت بالاتری برخوردار باشد.

به‌طور کلی، استفاده از شبکه‌های بیزی رویکردی نوآورانه و مبتنی بر داده در ارزیابی ریسک‌های شغلی فراهم می‌آورد، که امکان پیش‌بینی، پیشگیری و شناسایی زود هنگام پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم مواجهه با سروصدا را مهیا می‌سازد. این روش می‌تواند مبنایی برای اقدامات کنترلی هدفمند و مداخلات سلامت فردمحور بوده و به ارتقای دقت تصمیم‌گیری متخصصان

REFERENCES

1. Esmaili SV, Shakerian M, Lotfi S, Karimi A, Ghasemian H, Nakheipour M, et al. Noise-induced hearing loss and blood factors: results from a comprehensive cross-sectional study in Iran. *BMC Public Health*. 2025;25(1):1106.
2. Hener T. Noise pollution and violent crime. *J Public Econ*. 2022;215:104748.
3. Abbasi M, Yazdanirad S, Ahmadi A. Developing and validating a risk assessment method for noise-induced hearing loss in workers. *Heliyon*. 2024;10(22):e40475.
4. Natarajan N, Batts S, Stankovic KM. Noise-induced hearing loss. *J Clin Med*. 2023;12(6):2347.
5. Liberman MC. Noise-induced and age-related hearing loss: new perspectives and potential therapies. *F1000Research*. 2017;6:927.
6. Haile LM, Kamenov K, Briant PS, Orji AU, Steinmetz JD, Abdoli A, et al. Hearing loss prevalence and years lived with disability, 1990–2019: findings from the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*. 2021;397(10278):996–1009.
7. Daniel E. Noise and hearing loss: a review. *J Sch Health*. 2007;77(5):225–31.
8. Lie A, Skogstad M, Johannessen HA, Tynes T, Mehlum IS, Nordby KC, et al. Occupational noise exposure and hearing: a systematic review. *Int Arch Occup Environ Health*. 2016;89:351–72.
9. Tahir N, Aljunid SM, Hashim JH, Begum J. Burden of noise induced hearing loss among manufacturing industrial workers in Malaysia. *Iran J Public Health*. 2014;43(Suppl 3):148–53.
10. Hapsari A, Kusmawan D. Noise-Induced Hearing Loss (NIHL) risk factors among manufacturing industry workers: a systematic review. 2021.
11. Themann CL, Masterson EA. Occupational noise exposure: a review of its effects, epidemiology, and impact with recommendations for reducing its burden. *J Acoust Soc Am*. 2019;146(5):3879–905.
12. Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet*. 2014;383(9925):1325–32.
13. Han Y, Wu H, Geng Z, Zhu Q, Gu X, Yu B. Review: energy efficiency evaluation of complex petrochemical industries. *Energy*. 2020;203:117893.
14. Aroloye N. Impact of natural gas project on mangrove forest in coastal communities in the Niger Delta, Nigeria: evaluation, mitigation and management strategies. *SSRN*. 2019;31.
15. Olayinka OS, Abdullahi SA. An overview of industrial employees' exposure to noise in sundry processing and manufacturing industries in Ilorin metropolis, Nigeria. *Ind Health*. 2009;47(2):123–33.
16. Asghari M, Goudarzi F, Kohansal B, Abbasinia M, Moradzadeh R, Gorji R. Modeling noise annoyance using Bayesian networks: a case study of an industrial factory. *WORK*. 2024;10519815241290355.
17. Hussin MF, Zain SFM, Aziz MAA, Ismail I, Sulaiman AA. Classification of noise induced hearing loss using Bayesian optimization support vector machine. *Malays J Innov Eng Appl Soc Sci*. 2024;4(01):262–70.

18. Barrero JP, García-Herrero S, Mariscal MA, Gutierrez J. How activity type, time on the job and noise level on the job affect the hearing of the working population. Using Bayesian networks to predict the development of hypoacusia. *Saf Sci*. 2018;110:1–12.
 19. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliab Eng Syst Saf*. 2011;96(8):925–32.
 20. Sabry F. Bayesian network: fundamentals and applications. *One Billion Knowledgeable*; 2023.
 21. Lu Z, Cao Y, Zou Y, Li X, Yang F, Khakzad N, et al. Dynamic risk analysis of fire and explosion domino accidents at hydrogen refueling stations using dynamic Bayesian network. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;95:546–57.
 22. Chen L, Liao Y, Cen ZB, Zhang JW, Xiao MH, Wang Z. Analysis of disease burden and trends of noise-induced hearing loss in China from 1990 to 2019. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*. 2024;42(10):730–4.
 23. UCSFHealth. Comprehensive metabolic panel [Internet]. 2025 [updated 2025 Apr 24; cited 2026 Jun 14]. Available from: <https://www.ucsfhealth.org/medical-tests/comprehensive-metabolic-panel>
 24. ABIM. Laboratory test reference ranges [Internet]. American Board of Internal Medicine; 2025 [updated 2025 Apr 24; cited 2026 Jun 14]. Available from: <https://www.abim.org/Media/bfjryql/laboratory-reference-ranges.pdf>
 25. Medscape. Laboratory values – normal adult [Internet]. 2025 [updated 2025 Apr 24; cited 2026 Jun 14]. Available from: <https://emedicine.medscape.com/article/2172316-overview>
 26. Doctoreto. What is a Complete Blood Count (CBC) test? Understanding the CBC in routine blood analysis [Internet]. 2025 [updated 2025 Apr 24; cited 2026 Jun 14]. Available from: https://doctoreto.com/blog/complete-blood-count/?utm_source=chatgpt.com
 27. Maltby M. Occupational audiometry: monitoring and protecting hearing at work. Great Britain: Elsevier; 2005. 249 p.
 28. WHO. Obese and overweight. In: World Health Organization [Internet]. 2024 [cited 2026 Jun 14]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
 29. Song JH, Kim HR, Lee DW, Min J, Lee YM, Kang MY. Association between long working hours and liver enzymes: evidence from the Korea National Health and Nutrition Examination Survey, 2007–2017. *Ann Occup Environ Med*. 2022;34:e9.
 30. Raya-Cano E, Molina-Luque R, Vaquero-Abellán M, Molina-Recio G, Jiménez-Mérida R, Romero-Saldaña M. Metabolic syndrome and transaminases: systematic review and meta-analysis. *Diabetol Metab Syndr*. 2023;15(1):220.
 31. Su SB, Shi HX, Zhong X, Liu M, Li RZ, Wang TJ, et al. Risk assessment on noise-induced hearing loss of 488 workers in a petrochemical plant. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*. 2022;40(12):893–7.
 32. Abbasi M, Yazdanirad S, Zokaei M, Falahati M, Eyvazzadeh N. A Bayesian network model to predict the role of hospital noise, annoyance, and sensitivity in quality of patient care. *BMC Nurs*. 2022;21(1):243.
 33. Mohammadi H, Alimohammadi I, Roshani S, Pakzad R, Abdollahi MB, Dehghan SF. The effect of occupational noise exposure on blood and biochemical parameters: a case study of an insulator manufacturer in Iran. *Electron Physician*. 2016;8(1):1740–6.
 34. Kuang D, Yu YY, Tu C. Bilateral high-frequency hearing loss is associated with elevated blood pressure and increased hypertension risk in occupational noise exposed workers. *PLoS One*. 2019;14(9):e0222135.
 35. Miao L, Zhang J, Yin L, Pu Y. Hearing loss and hypertension among noise-exposed workers: a pilot study based on baseline data. *Int J Environ Health Res*. 2023;33(8):783–95.
۳۶. بهداشت، و حدود مجاز مواجهه شغلی. تهران: مرکز سلامت محیط و کار، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی؛ ۱۳۹۹.

جدول ضمیمه ۱: طبقه بندی داده های مورد استفاده در شبکه بیزی برای گسسته سازی متغیرها (۲۳:۲۶)

فشار خون دیاستولیک (mmHg)	فشار خون سیستولیک (mmHg)	قد (cm)	وزن (Kg)	سن (سال)	BMI
کمتر از ۸۰	کمتر از ۱۲۰	کمتر از ۱۶۰	کمتر از ۷۰	کمتر از ۳۰	کمتر از ۲۰
بین ۸۰-۹۰	بین ۱۲۰-۱۳۰	بین ۱۷۰-۱۶۰	بین ۷۰-۸۰	بین ۳۰-۴۰	بین ۲۰-۲۵
بین ۹۰-۱۲۰	بین ۱۳۰-۱۴۰	بین ۱۸۰-۱۷۰	بین ۸۰-۹۰	بین ۴۰-۵۰	بین ۲۵-۳۰
بالاتر از ۱۲۰	بین ۱۴۰ تا ۱۸۰	بین ۱۸۰ تا ۱۹۰	بین ۹۰ تا ۱۰۰	بین ۵۰ تا ۶۰	بین ۳۰ تا ۳۵
	بالاتر از ۱۸۰	بالاتر از ۱۹۰	بالاتر از ۱۰۰	بالاتر از ۶۰	بالاتر از ۳۵
TG (mg/dL)	ALT (U/L)	AST (U/L)	HDL (mg/dL)	LDL (mg/dL)	Chol (mg/dL)
کمتر از ۲۰۰	کمتر از ۴۰	کمتر از ۳۸	کمتر از ۳۵	کمتر از ۱۰۰	کمتر از ۲۰۰
بالاتر از ۲۰۰	بالاتر از ۴۰	بالاتر از ۳۸	بین ۳۵-۵۰	بین ۱۳۰-۱۶۰	بین ۲۴۰-۲۰۰
			بالاتر از ۵۰	بالاتر از ۱۶۰	بالاتر از ۲۴۰
HCT	HGB	RBC (/10 ⁶ μ L)	RDW (%)	PLT (/10 ³ μ L)	WBC (/10 ³ μ L)
کمتر از ۴۰	کمتر از ۱۴	کمتر از ۴	کمتر از ۱۱	کمتر از ۱۰۰	کمتر از ۴
بین ۴۰-۵۰	بین ۱۴-۱۷	بین ۴-۵	بین ۱۱-۱۴	بین ۱۰۰-۴۵۰	بین ۴-۱۱
بالاتر از ۵۰	بالاتر از ۱۷	بالاتر از ۵	بالاتر از ۱۴	بالاتر از ۴۵۰	بالاتر از ۱۱
		FBS (mg/dL)	MCV (fL)	تراز فشار صوت (dB)	تجربه کاری (سال)
		کمتر از ۱۰۰	کمتر از ۸۰	کمتر از ۸۰	کمتر از ۵
				بین ۸۰-۸۵	بین ۵-۱۰
		بالاتر از ۱۰۰	بین ۸۰-۱۰۰	بالاتر از ۸۵	بین ۱۰-۲۰
					بالاتر از ۲۰