Archives of
Rehabilitation

Winter 2026. Vol 26. Num 4

Research Paper

Effectiveness of the Fall-Proof Rehabilitation Exercise Software on Light Touch and Vibration Sensory Function in Patients with Diabetic Polyneuropathy

Sahar Sadeghi Sedeh[1,2], *Saeid FatorehChy[1], Nazila Akbarfahimi[1], Seyed Ali Hosseini[1], Hamid Dalvand[3], Enayat allah Bakhshi[4], Bahman Sadeghi Sedeh[5]

1. Department of Occupational Therapy, Faculty of Rehabilitation Sciences, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran.
2. Department of Occupational Therapy, Iranian Research Center on Aging, Faculty of Rehabilitation Sciences, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran.
3. Department of Occupational Therapy, Faculty of Rehabilitation, Tehran university of medical sciences, Tehran, Iran.
4. Department of Biostatics and Epidemiology, Faculty of Rehabilitation Sciences, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran.
5. Department of Social Medicine, Faculty of Medicine, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation Sadeghi Sedeh S, FatorehChy S, Akbarfahimi N, Hosseini SA, Dalvand H, Bakhshi E. Effectiveness of the Fall-Proof Rehabilitation Exercise Software on Light Touch and Vibration Sensory Function in Patients with Diabetic Polyneuropathy. Archives of Rehabilitation. 2026; 26(4):528-551. https://doi.org/10.32598/RJ.26.4.3358.2

https://doi.org/10.32598/RJ.26.4.3358.2

ABSTRACT

Objective Diabetic polyneuropathy (DPN) is one of the most common complications of type 2 diabetes, characterized by diminished light touch and vibration perception, leading to impaired balance and increased fall risk among older adults. Despite its high prevalence, evidence on targeted sensory rehabilitation remains limited. This study aimed to evaluate the effectiveness of a Fall-Proof rehabilitation exercise software in improving sensory function in elderly patients with DPN.

Materials & Methods This study was a single-blind clinical trial conducted in 2025 at Sadeghieh Tahereh Hospital in Isfahan. A total of 96 patients diagnosed with diabetic peripheral neuropathy, confirmed using the michigan neuropathy screening instrument (MNSI), were randomly assigned via adaptive randomization into three groups: An in-person intervention group, a virtual intervention group (utilizing a dedicated software platform), and a control group. The intervention groups performed FallProof™ balance exercises for eight weeks (two sessions per week), either in person or virtually, whereas the control group received only standard care. Sensory function—including light touch sensation at the third and fifth metatarsal heads and the hallux, as well as vibratory sensation at the hallux—was assessed at four time points: pre-intervention, immediately post-intervention, and at 2- and 3-month follow-ups. Data were analyzed using non-parametric statistical tests, including the Friedman test, Wilcoxon signed-rank test, and Mann–Whitney U test, with significance set at $P<0.05$.

Results Both intervention groups showed significant improvements in all sensory indices ($P<0.05$), with the greatest gains observed at the 5th metatarsal and hallux. Compared with controls, the digital intervention group demonstrated superior improvements in light touch at the 5th metatarsal (+1.80 units), hallux (+1.22 units), and vibration perception (+0.36 units). Importantly, these sensory improvements persisted for up to 3 months in the digital group, whereas the control group experienced progressive decline.

Conclusion Fall-proof exercises, particularly when delivered through interactive rehabilitation software, produced significant, targeted, and sustained improvements in tactile and vibration perception in elderly patients with DPN. These findings underscore the potential of digital-based interventions in sensory rehabilitation and fall prevention, supporting their integration into home-based rehabilitation programs for high-risk populations.

Keywords Diabetic peripheral neuropathy, Fall-proof exercises, Digital rehabilitation, Light touch sensation, Vibration perception

Received: 03 Sep 2025
Accepted: 11 Nov 2025
Available Online: 01 Jan 2026

Corresponding Author:
Saeid FatorehChy
Address: Department of Occupational Therapy, Faculty of Rehabilitation Sciences, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran.
Tel: +98 (912) 3768849
E-Mail: saeidfatorehchy@yahoo.com

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Type 2 diabetes mellitus is a chronic and progressive metabolic disorder characterized by hyperglycemia resulting from insulin resistance and impaired beta-cell function. According to the International Diabetes Federation (IDF), over 500 million people worldwide currently live with diabetes, a figure projected to rise to 700 million by 2045 [1].This escalating prevalence imposes a substantial burden not only on healthcare systems but also on patients and their families, particularly in aging populations such as Iran's, where the demographic shift toward older adulthood amplifies the socioeconomic and clinical challenges of chronic disease management [2].

Among the most debilitating chronic complications of diabetes is diabetic peripheral neuropathy, affecting 30–50% of patients and marked by progressive damage to sensory, motor, and autonomic nerve fibers. Sensory manifestations—including diminished light touch sensation, impaired proprioception, and elevated vibration perception thresholds—directly compromise postural control, gait stability, and functional mobility, thereby significantly increasing fall risk in elderly populations [3]. Supporting this, Sadeghi Sedeh et al. (2023) demonstrated that diabetic patients, particularly those with confirmed diabetic polyneuropathy (DPN), exhibit markedly reduced scores on the BBS and diminished strength in distal ankle muscles compared to non-neuropathic controls. This muscular weakness, especially in the ankle dorsiflexors and plantar flexors, contributes to functional balance deficits and altered gait patterns, further elevating fall susceptibility [4].

Given the absence of pharmacological interventions capable of fully restoring neural function in DPN, clinical emphasis has shifted toward sensorimotor rehabilitation strategies. Systematic reviews and randomized controlled trials indicate that targeted strengthening of lower limb musculature—particularly around the ankle joint—can improve plantar pressure distribution, joint mobility, walking speed, nerve conduction velocity, and peripheral sensory function in diabetic patients [5, 6]. Moreover, flexibility and resistance training programs for the foot and ankle have been shown to reduce recurrence rates of diabetic foot ulcers, mitigate neuropathic symptom severity, enhance gait efficiency, and ultimately contribute to fall prevention [7-10]. Supervised, structured exercise regimens, when coupled with consistent follow-up, have proven effective in reducing DPN-related sensory deficits [11, 12], improving vibration perception [13], restoring ankle mobility [14], optimizing plantar pressure distribution during ambulation [15], and enhancing overall lower limb strength and function [16, 17].

Among rehabilitative approaches, Fall-Proof exercises have emerged as a comprehensive, evidence-based intervention designed specifically for fall prevention in older adults [18]. These multimodal exercises integrate static and dynamic balance training, tactile sensory stimulation, and progressive resistance components to activate peripheral sensory pathways and enhance fundamental postural control mechanisms [19]. A recent systematic review concluded that an 8-week Fall-Proof program (three 40–50-minute sessions per week) significantly improves functional balance and reduces fear of falling in adults over 60, recommending its adoption as both a preventive and therapeutic modality following initial assessment and proper instruction [20]. Studies on healthy older adults corroborate these findings: Khazanin et al. [21] reported significant reductions in fall incidence and improved postural strategies following an 8-week fall-proof intervention, while other research has documented enhanced tactile sensitivity and vibration perception following balance-focused training. These improvements are attributed to increased peripheral sensory feedback, which facilitates neural pathway activation and proprioceptive recalibration.

However, a close examination of existing resources reveals that most studies conducted in the field of fall-prevention exercises have focused on healthy or low-risk populations, with little attention given to elderly individuals with diabetic polyneuropathy (DPN), who are among the highest-risk groups for falls and neuropathic complications. Additionally, fall-prevention exercises have primarily been implemented in clinical or group settings in-person, with no structured framework available for their home-based or digital implementation. Moreover, the available resources lack interactive instructional videos and real-time feedback systems to ensure proper execution of exercises by users. Most importantly, no interactive and specialized software for implementing fall-prevention exercises in the diabetic neuropathy population has been designed or evaluated, despite the critical need for such a tool in this patient group [22].

Therefore, there is a significant research and practical gap in the design and evaluation of digital interventions aimed at improving basic sensory functions, especially

tactile sensation and vibration perception, in elderly individuals with diabetic neuropathy. Designing a training software that can deliver fall-prevention exercises in a standardized, interactive, and trackable manner could be a crucial step toward enhancing safety, functional independence, and quality of life for these patients.

Thus, the present study aimed to evaluate the effectiveness of fall-prevention-based training software on improving tactile sensation and vibration perception in elderly individuals with DPN. This research seeks to provide a practical and scientific response to one of the emerging needs in the field of digital rehabilitation for the elderly diabetic population, and pave the way for the development of cost-effective, scalable, and efficient interventions in home settings. The main hypothesis of this study is that regular use of fall-prevention-based training software can lead to significant improvements in tactile sensation and vibration perception in elderly individuals with DPN, as repetitive and targeted sensory stimulation can facilitate neuroplasticity and functional recovery in the peripheral nervous system.

Materials and Methods

In the first phase, the fall-prevention exercise software was designed and developed in four stages:

Production of instructional videos

Fall-prevention exercises, including static and dynamic balance exercises, ankle muscle strengthening, and foot sensory stimulation, were recorded and edited as short instructional videos (each no longer than 10 minutes). These videos were created in coordination with Rose et al. (the primary designer of fall-prevention rehabilitation exercises) [23].

Content validation

The content validity and face validity of the videos were assessed using content validity ratio (CVR) (minimum acceptable value: 0.78) and content validity index (CVI) (minimum acceptable value: 0.79). A panel of 8 experienced occupational therapists (with at least 5 years of clinical practice) participated in the evaluation, which was based on three main criteria: content necessity, clarity of expression, and relevance to the rehabilitation goals for diabetic neuropathy. The videos were approved based on these criteria.

Technical development

The software was developed using Java (for Android) and PHP/MySQL (for backend). Features such as two-factor authentication, video streaming, a discussion forum, automatic session reminders, and user feedback recording were integrated into the software.

Pilot study

The initial version of the software was tested on 6 patients with diabetic peripheral neuropathy. The results showed that the software was user-friendly, the instructions were clear, and the session scheduling was appropriate. After making minor adjustments, the final version was prepared for use in the clinical trial.

In the second phase of the study (clinical intervention), patients with type 2 diabetes who had visited the diabetes clinic at Sadeghieh Tahereh Hospital in Isfahan were included in the study. Given the estimated 30% prevalence of diabetic peripheral neuropathy DPN in the diabetic population [24], and considering a 5% margin of error and a 95% confidence level, the required sample size for initial screening was estimated to be approximately 280 participants.

After initial screening using the michigan neuropathy screening instrument (MNSI) and applying inclusion and exclusion criteria, 96 eligible patients were selected. These individuals were randomly assigned into three groups of 32 participants: the in-person intervention group, the virtual intervention group (using the fall-prevention software developed in the study), and the control group.

Participant allocation to groups was performed by an independent researcher using the Minimization algorithm [25] to maintain balance between the groups in terms of two key variables: “duration of diabetes” and “severity of DPN.” This algorithm is an adaptive randomization method designed to minimize differences between groups concerning intervening variables (in this study: duration of diabetes and severity of DPN) (Equation 1).

To maintain single-blind assessment, evaluators and statistical analysts were unaware of the group assignments of participants.

1. $$n = \frac{\left(z_{1-\frac{\alpha}{2}} + z_{1-\beta}\right)^2 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{d^2} = \frac{(1.96+0.84)^2 \left(2.46^2 + 2.78^2\right)}{(16.21-14.37)^2} = 31.91 = 32$$

Inclusion criteria for the study

1. Age 60 years and older: Given that type 2 diabetes typically begins in the fourth or fifth decade of life and diabetic neuropathy often occurs several years after the onset of the disease, this age range was chosen to focus on the target population with a higher likelihood of developing diabetic peripheral neuropathy [26];

2. Confirmed diagnosis of type 2 diabetes and an active medical record at Sadeghieh Tahereh Hospital in Isfahan: Participants must have visited the diabetes clinic of Sadeghieh Tahereh Hospital at least once in the past six months, with diagnostic and treatment-related information available in the hospital's electronic health records system. This criterion was applied to ensure diagnostic accuracy, treatment follow-up, and access to valid clinical data for the initial assessment of participants;

3. Presence of signs of diabetic peripheral neuropathy as assessed by the MNSI, with a score ≥2 [27];

4. Ability to walk and maintain balance without the use of assistive devices, with a score greater than 20 on the BBS (BBS) [28];

5. Access to a smartphone for participants in the virtual intervention group;

6. Active participation in at least 90% of the sessions and exercises in the intervention groups;

7. Relatively controlled diabetes, with HbA1c levels less than 8% and blood pressure less than 140/90 mmHg;

8. Ability to provide informed consent and cooperate throughout the study period.

Exclusion criteria

1. Active foot ulcers, lower extremity surgery, or arthroplasty; 2. Diagnosis of severe neurological or cognitive disorders; 3. Receiving concurrent physical therapy or occupational therapy services similar to the intervention; 4. Occurrence of vascular complications or advanced retinopathy.

Inability or unwillingness to continue participation after three follow-up attempts.

Intervention groups

In-person intervention group

Participants in this group performed fall-prevention exercises twice a week (each session lasting 40 minutes with a 10-minute break) in person under the direct supervision of an occupational therapist at the clinic.

Virtual intervention group

After an in-person training session, participants in this group performed exercises at home using the developed software. This Android-based software was installed on the participants' mobile phones, providing features such as video review, progress tracking, automatic reminders, and the ability to send messages to the therapist. No special equipment was required for home-based exercises, and if participants did not log into the software for more than five days, a reminder SMS was sent, and the researcher followed up.

Control group

The control group received only usual diabetes care including pharmacological treatment, dietary counseling, and lifestyle education, without any exercise intervention.

The fall-proof training followed a progressive structure over eight weeks, with intensity and complexity gradually increased [19, 23]. In weeks 1–2, exercises focused on center-of-mass control, seated weight-shifting, flexibility, and isometric ankle strengthening (12 repetitions, 4–5 sets, 6-second holds). In weeks 3–4, the program included sit-to-stand transfers, static single-leg stance, and dynamic gait tasks with object manipulation (15 repetitions, 8-second holds). In weeks 5–6, multisensory and coordination drills, balance perturbations, and gait pattern enhancement were added (20 repetitions, 10-second holds). In weeks 7–8, participants progressed to advanced postural strategy training, stretching, one-leg transfers with object control, and further progression of gait and balance tasks (25 repetitions, 12-second holds) [19, 23].

Outcomes were assessed at baseline, immediately post-intervention (week 8), and at two and three months after intervention by a trained occupational therapist blinded to group allocation.

Severity of DPN

In this study, the severity of DPN was assessed using the MNSI questionnaire. This tool consists of 15 questions regarding sensory symptoms and foot function. In this questionnaire, a "yes" answer to questions 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, and 15, and a "no" answer to questions 7 and 13, each receive a score of 1. Question 4 relates to circulatory deficiency, and question 10 pertains to the internal validity of the questionnaire (a "lie detection" control question), which are not included in the final score calculation. Therefore, the total score ranges from 0 to 13, with higher scores indicating greater severity of diabetic neuropathy [29].

Tactile sensation

Tactile sensation was assessed using the Semmes-Weinstein 10-gram monofilament on three key areas of the foot (third metatarsal, fifth metatarsal, and hallux) [29, 30].

Vibration sensation

Vibration sensation was assessed using a 128 Hz tuning fork placed on the distal phalanx of the hallux. The time (in seconds) from the start of the vibration until the patient could no longer feel the vibration was recorded [31].

Functional balance

Functional balance was assessed using the Berg balance scale (BBS). This scale consists of 14 items (common activities of daily living), and each item is rated on a five-point scale, ranging from 0 to 4, based on the quality or time spent completing the task. A score of 0 indicates the need for maximum assistance, and a score of 4 indicates the individual's independence in performing the task. The maximum possible score is 56, which is derived from the sum of scores from various sections of the test. A score between 41 and 56 indicates high balance, meaning a low risk of losing balance and falling. A score between 21 and 40 indicates moderate balance, with a moderate risk of falling, and a score between 0 and 20 indicates low balance, with a high risk of falling. The reliability of each section of the BBS was reported to be 0.98, the reliability of each individual item was 0.99, and the internal consistency was 0.96 [32].

Data distribution was examined with the Kolmogorov–Smirnov and Shapiro–Wilk tests. Between-group comparisons were performed using the Kruskal–Walli's test, within-group changes over time with the Friedman test, and pairwise group comparisons with the Mann–Whitney U test adjusted with Bonferroni correction. A $P<0.05$ was considered statistically significant.

Results

In this single-blind clinical trial, 96 eligible patients were randomly divided into three groups of 32 participants each: In-person intervention, virtual intervention (using the software), and control. The three groups were comparable in terms of baseline variables, including average age (66.93, 67.53, and 67.96 years, respectively; P=0.848), body mass index (24.55, 25.22, and 24.86, respectively; P=0.772), and duration of diabetes (years) (P=0.563).

Additionally, the three groups were similar in terms of HbA1c levels (6.83, 6.70, and 6.93%, respectively; P=0.271), fasting blood glucose (mg/dL) (P=0.938), blood pressure (mmHg) (P=0.703), and the severity of neuropathy as assessed by the MNSI (8.81, 8.28, 8.34, respectively; P=0.649), based on the information in their medical records and clinical examination.

Vibration sensation

Based on the Kruskal-Wali's test, there was no significant difference among the three groups in the pretest (P=0.750). After the intervention, both intervention groups (in-person and digital) showed a significant improvement in vibration sensation ($P\leq0.002$), while the control group showed a significant decline (P=0.006). In comparing the groups, the digital intervention led to an increase of 0.359 units and the in-person intervention led to an increase of 0.021 units in vibration sensation. Although the difference between the two intervention groups was not statistically significant (P=0.114), the digital group showed the greatest improvement, and this improvement remained stable up to 3 months after the intervention (Table 1 and Figure 1). Based on repeated measures analysis and Bonferroni test, results are shown in Figure 1. Effectiveness of Intervention on Light Touch Sensation

Light touch sensation at the 3rd metatarsal

Based on the Kruskal-Wali's test, there was no significant difference among the groups in the pretest ($p = 0.539$). After the intervention, the digital group showed an improvement of 0.953 units and the in-person group showed an improvement of 0.679 units ($P<0.001$). The difference between the two intervention groups was not

significant (p = 0.210), but both were significantly better than the control group (Table 2 and Figure 2).

Based on repeated measures analysis and Bonferroni test, results are shown in Figure 2.

Light touch sensation at the 5th metatarsal

Based on the Kruskal-Walli's test, this region—which plays a key role in balance and walking—showed the greatest improvement. There was no difference among groups in the pretest (P=0.109). After the intervention, the digital group improved by 1.804 units and the in-person group improved by 1.179 units (P<0.001). The difference between the two intervention groups was significant (P=0.001), with the digital group performing better. This improvement remained stable up to 3 months after the intervention (Table 3 and Figure 3).

Based on repeated measures analysis and Bonferroni test, results are shown in Figure 3.

Light touch sensation at the hallux

Based on the Kruskal-Wali's test, there was no significant difference in the pretest (P=0.591). After the intervention, the digital group showed an improvement of 1.218 units and the in-person group showed an improvement of 0.929 units (P<0.001). The difference between the two intervention groups was not significant (P=0.112), but both performed significantly better than the control group. The improvement in the digital group remained stable up to 3 months after the intervention (Table 4 and Figure 4).

Based on repeated measures analysis and Bonferroni test, results are shown in Figure 4.

Discussion

The findings of this study revealed that the implementation of the "Fall-Proof" rehabilitation program, both in-person and virtually, had a significant positive effect on the improvement of sensory performance, including light touch and vibration sense, in patients with diabetic neuropathy, without causing serious side effects. Prior to the intervention, all patients experienced sensory impairments, but after 8 weeks, a remarkable improvement was observed in the intervention groups, particularly in the fifth metatarsal and hallux areas, which play a key role in balance control and fall prevention. These changes were more prominent in the virtual group than in the in-person group, and remained stable for up to three months after the intervention ended. In contrast, the control group showed not only no improvement but also a decline in sensory performance.

The study's findings indicated that the "Fall-Proof" rehabilitation program had a significant positive effect on sensory performance in both in-person and virtual formats. Mechanistically, the improvement in sensory performance could be related to neural plasticity and enhanced synaptic connections in sensory pathways. The repeated stimulation of the soles during exercises activated mechanoreceptors and transmitted more precise information to the central nervous system. This process led to improved tactile and vibratory perception, ultimately enhancing the accuracy of postural responses [33].

Furthermore, the improvement in the virtual group was not only greater in effect size but also persisted for three months after the intervention ended. This remarkable advantage, despite the approximate similarity in duration and number of training sessions between the two groups, could be attributed to the inherent features of the digital environment and the interactive design of the software. The software used functioned beyond a video playback platform, providing real-time feedback, automatic session reminders, and recording individual progress, thus creating conditions for sustainable sensory-motor learning. Studies have shown that targeted and repetitive sensory stimulation, even with equal exercise volume, will be more effective when combined with behavioral reinforcement and intrinsic motivation [34, 35]. In the in-person group, although the sessions were under direct supervision, there was no mechanism to encourage home practice or behavior monitoring between sessions. In contrast, the software continuously engaged the user in the rehabilitation process.

Moreover, the familiar home environment in the virtual group may have helped reduce cognitive and physiological stress. Evidence shows that clinical environments or the presence of a therapist can increase anxiety and decrease sensory focus in some elderly individuals, especially those with chronic diseases [33]. In contrast, performing exercises in a calm and personal environment allows for deeper processing of sensory feedback, thus facilitating neuroplasticity in sensory-environmental and cortical pathways [36].

Table 1. Comparison of vibration sensation across the three groups over time (n=32)

Groups	Assessment Time	Mean±SD	Mean Rank	P*
In-person	Pre-intervention	2.31±69	2.27	0.002
	Post-intervention	2.5±0.67	2.42	
	2 months after	2.68±0.93	2.61	
	3 months after	2.78±1.09	2.7	
Digital	Pre-intervention	2.4±0.66	2.08	0.001
	Post-intervention	2.71±0.85	2.27	
	2 months after	3.03±1.03	2.66	
	3 months after	3.56±1.26	3	
Control	Pre-intervention	2.43±0.71	2.36	0.006
	Post-intervention	2.4±0.71	2.33	
	2 months after	2.62±0.79	2.58	
	3 months after	2.81±1.02	2.73	

*Friedman test.

Archives of Rehabilitation

Table 2. Comparison of light touch sensation at the 3rd metatarsal across the three groups over time (n=32)

Group	Assessment Time	Mean±SD	Mean Rank	P*
In-person	Pre-intervention	2.28±0.68	2.17	0.001
	Post-intervention	2.56±0.66	2.44	
	2 months after	2.65±0.74	2.53	
	3 months after	3.03±1.2	2.86	
Digital	Pre-intervention	2.4±1.2	2.08	0.001
	Post-intervention	2.78±0.9	2.41	
	2 months after	3±0.91	2.59	
	3 months after	3.43±1.21	2.92	
Control	Pre-intervention	2.21±0.7	2.86	0.001
	Post-intervention	2.09±0.64	2.7	
	2 months after	1.84±0.67	2.34	
	3 months after	1.65±0.7	2.09	

*Friedman Test.

Archives of Rehabilitation

Table 3. Comparison of light touch sensation at the 5th metatarsal across the three groups over time (n=32)

Group	Assessment Time	Mean±SD	Mean Rank	P*
In-person	Pre-intervention	2.9±0.73	2.27	0.045
	Post-intervention	3.06±1.16	2.25	
	2 months after	3.46±1.21	2.63	
	3 months after	3.71±1.3	2.86	
Digital	Pre-intervention	3.31±1.35	2.05	0.001
	Post-intervention	3.78±1.23	2.33	
	2 months after	4.03±1.14	2.58	
	3 months after	4.53±1.01	3.05	
Control	Pre-intervention	2.78±0.94	3.25	0.001
	Post-intervention	2.09±0.64	2.55	
	2 months after	1.84±0.67	2.22	
	3 months after	1.71±1.05	1.98	

*Friedman Test

Archives of Rehabilitation

Table 4. Comparison of light touch sensation at the hallux across the three groups over time (n=32)

Group	Assessment Time	Mean±SD	Mean Rank	P*
In-person	Pre-intervention	2.31±0.69	1.94	0.001
	Post-intervention	2.65±0.54	2.31	
	2 months after	3.15±0.8	2.8	
	3 months after	3.46±1.36	2.95	
Digital	Pre-intervention	2.46±0.67	1.75	0.001
	Post-intervention	2.81±0.47	2.09	
	2 months after	3.46±0.8	2.86	
	3 months after	4±1.39	3.3	
Control	Pre-intervention	2.31±0.73	3.05	0.001
	Post-intervention	1.93±0.66	2.42	
	2 months after	2.06±0.61	2.63	
	3 months after	1.56±0.84	1.91	

*Friedman Test

Archives of Rehabilitation

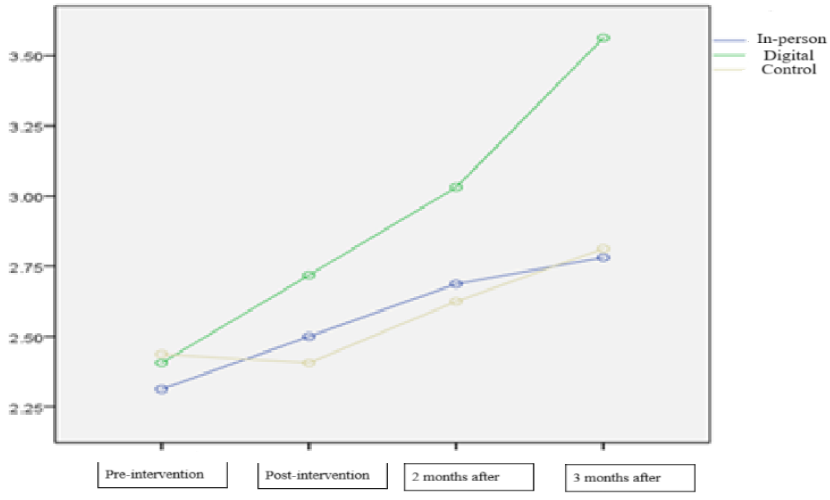


Figure 1. Comparison of changes in vibration sensation across the three groups

Archives of
Rehabilitation

Additionally, the stepwise and gradual design of the exercises in the software, along with the option to review the videos unlimited times, allowed participants to personalize their learning speed. This feature, particularly in the elderly population with high variability in cognitive and sensory performance, could play a key role in stabilizing learning [34].

In contrast, the control group not only showed no improvement but also experienced a significant decline in sensory performance, which aligns with the natural progression of diabetic peripheral neuropathy in the absence of intervention.

These findings are consistent with several studies. For example, Babb et al. [37] demonstrated that foot muscle strengthening exercises combined with sensory stimulation improved touch sensitivity and balance in diabetic patients. Similarly, Atre et al. [38] reported that functional exercises and sensory training improved vibration sense and motor safety in patients. Khurshid et al. [34], also confirmed the positive effect of combined exercises on touch sensitivity and balance in diabetic patients. Feng et al. [35] showed that a smart rehabilitation program improved vibration sense and movement confidence in neuropathic patients. These pieces of evidence reinforce the findings of the present study and emphasize the role of targeted foot stimulation in improving sensory performance.

However, the results of some studies were not aligned with our findings. For instance, Eddo et al. [39] in a large clinical trial showed that the implementation of a combined exercise program, including aerobic and resistance exercises, improved balance and walking performance but did not result in any significant changes

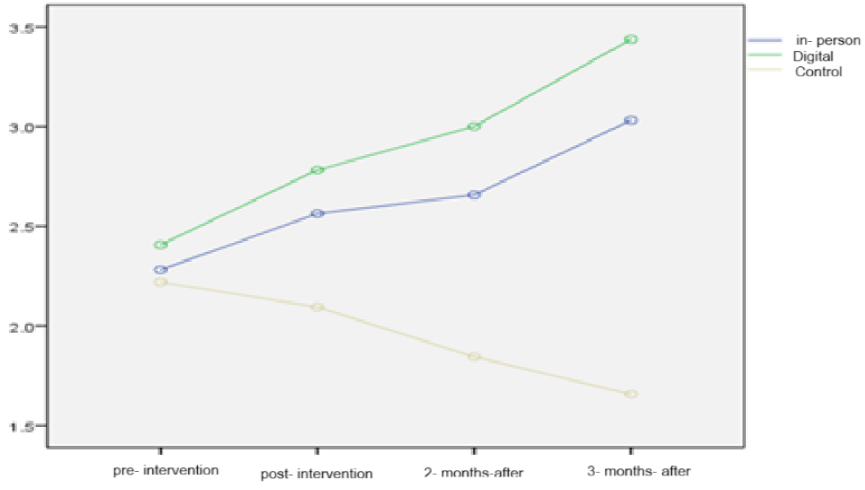


Figure 2. Comparison of changes in light touch sensation at the 3rd metatarsal across the three groups

Archives of
Rehabilitation

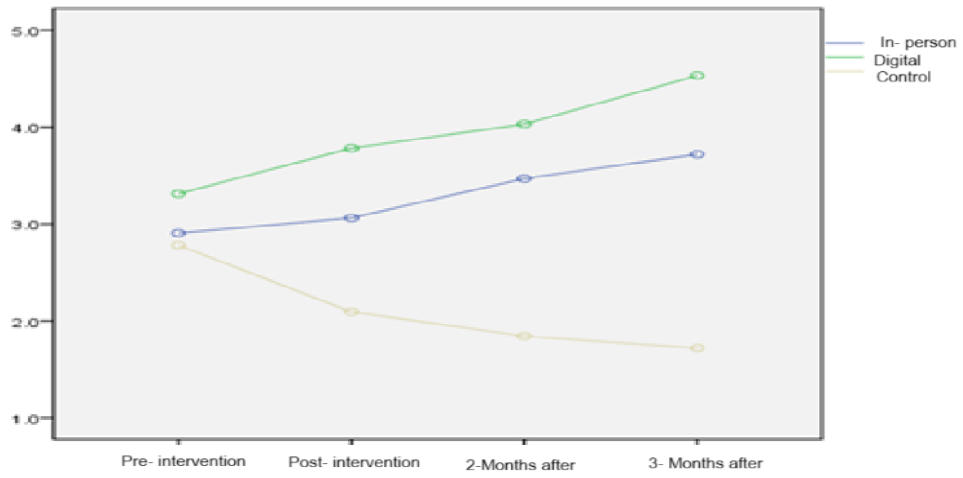


Figure 3. Comparison of changes in light touch sensation at the 5th metatarsal across the three groups

Archives of
Rehabilitation

in touch sensitivity or vibration threshold. Similarly, Calagan et al. [40] reported that balance and strengthening interventions reduced the fall risk but showed no improvement in proprioception or tactile sense. Margestren et al. [41] also found that even after 6 months of structured rehabilitation exercises, there were no significant changes in neurophysiological parameters or touch sensitivity in patients with severe neuropathy.

The differences between the results of the present study and the studies that did not align with our findings may be due to several factors.

1. First, the severity of the disease and the stage of neuropathy in the populations studied varied. In the present study, participants had mild to moderate neuropathy, whereas studies such as Margestren et al. [41] examined patients with advanced neuropathy and severe nerve damage (confirmed by neurophysiological criteria) and reported that even after 6 months of structured exercises, no significant improvement in touch sensitivity or vibration threshold was observed.

2. Second, the type of intervention and focus of the programs is a determining factor. Some studies, such as Eddo et al. [39], primarily focused on aerobic exercises and lifestyle changes, and although they improved balance and motor performance, they did not have a significant impact on touch sensitivity or vibration perception. Also, Calagan et al. [40] in a systematic review showed that interventions focused solely on glucose control or general exercises, without targeted sensory stimulation, cannot restore peripheral sensory function. In contrast, the present study, by combining balance, strengthening exercises, and targeted sensory stimulation of the soles (particularly in the fifth metatarsal and hallux areas), created conditions to induce sensory neuroplasticity.

3. Third, the duration of the intervention and follow-up also matters. Studies with short-term durations (e.g.

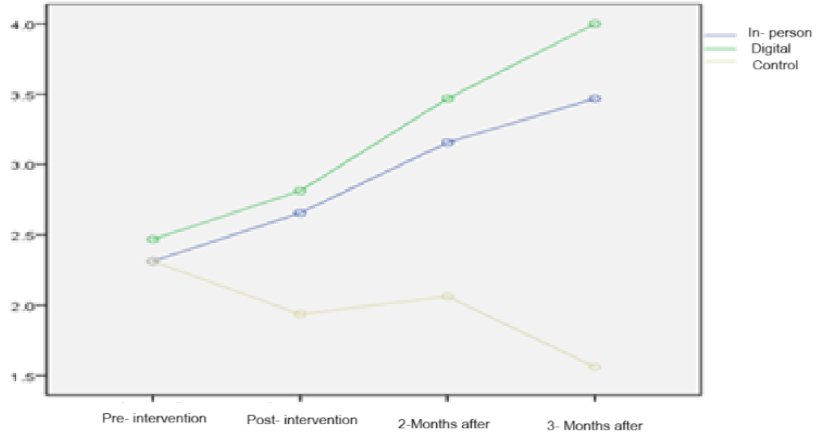


Figure 4. Comparison of changes in light touch sensation at the hallux across the three groups

Archives of
Rehabilitation

6 weeks) may not provide enough time to induce sustained neural changes [33]. In contrast, the present study, by combining balance, strengthening exercises, and targeted sensory stimulation, along with a three-month follow-up, provided optimal conditions for improving and stabilizing changes.

It is recommended that future studies examine the long-term sustainability of the effects of these exercises. Physiological analyses to identify the mechanisms of sensory improvement are also necessary. Additionally, examining the effects of these exercises on other functional dimensions such as balance, gait, and quality of life and comparing them with other exercise methods is suggested. Evaluating the effectiveness of these interventions in other high-risk populations and, ultimately, studying the relationship between improved sensory performance and reduced fear of falling and enhanced balance can provide a more comprehensive understanding of the therapeutic effects.

Among the limitations of this study is the impossibility of fully blinding participants to the type of intervention; although the study was designed as a single-blind study, participants were aware of the intervention type (in-person or virtual) due to the nature of the exercises, which may have influenced perceived outcomes. Additionally, in the virtual intervention group, it was not possible to accurately monitor adherence to exercises and their actual duration, relying instead on self-reported data from participants. This may have led to bias in estimating the true effectiveness of the intervention, especially since initial results may have increased participants' intrinsic motivation to continue the exercises.

Conclusion

This study, with its dual design (face-to-face and virtual delivery) and specific focus on patients with diabetic peripheral neuropathy, provides new evidence in the field of digital rehabilitation. The findings indicate that virtual training is not only a viable alternative to conventional face-to-face methods but, in some key domains—including light touch and vibration sensation—may even achieve superior outcomes. Therefore, the Fall-Proof program, particularly in its digital format, represents an innovative, safe, and effective approach for improving sensory function and enhancing quality of life in patients with diabetes.

Sponsor:

The present study is part of the findings of the first author's doctoral thesis in the Department of Occupational Therapy, Tehran University of Rehabilitation and Social Health Sciences. The University of Rehabilitation and Social Health Sciences has financially supported this article.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study has been approved by the Ethics Committee of the University of Rehabilitation and Social Health Sciences with the ethics code (IR.USWR.REC.1403.136) and this study has been registered with the Iranian Clinical Trial Registry with the code (IRCT20181117041673N2). In this study, written consent was obtained from all participants and the research process was fully explained.

Funding

This research was financially supported by the Vice-Chancellor for Research of the University of Social Welfare and Rehabilitation Sciences, Tehran.

Authors' contributions

Conceptualization: Sahar Sadeghi Sedeh and Saeed FatorehChy; methodology: Bahman Sadeghi Sedeh and Nazila Akbarfahimi; validation: Seyed Ali Hosseini; resources, writing original draft, editing & review: Bahman Sadeghi Sedeh and Sahar Sadeghi Sedeh; supervision and project administration: Saeed FatorehChy and Enayat Bakhshi.

Conflict of interest

The authors declare that there is no financial, scientific, or personal conflict of interest related to this study.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the patients who participated in this study as well as the staff of the Diabetes Clinic at Sedigheh Tahereh Hospital, Isfahan, for their valuable cooperation during the screening and intervention phases. The authors also acknowledge the Fall-Proof software development team, especially Mr. Mansour Patro.

مقاله پژوهشی

اثربخشی نرم‌افزار تمرینات توان‌بخشی فال-پروف بر عملکرد حس لامسه سبک و ویبریشن در سالمندان مبتلا به پلی نوروپاتی دیابتی

سحر صادقی سده[۲،۱]، *سعید فطوره‌چی[۱]، نازیلا اکبرفهیمی[۱]، سیدعلی حسینی[۱]، حمید دالوند[۳]، عنایت‌الله بخشی[۴]، بهمن صادقی سده[۵]

۱. گروه کاردرمانی، دانشکده علوم توان‌بخشی، دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران.
۲. گروه کاردرمانی، مرکز تحقیقات سالمندی، دانشکده علوم توان‌بخشی، دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران.
۳. گروه کاردرمانی، دانشکده توان‌بخشی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.
۴. گروه آمار زیستی و اپیدمیولوژی، دانشکده علوم توان‌بخشی، دانشگاه علوم توان‌بخشی و سالمت اجتماعی، تهران، ایران.
۵. گروه پزشکی اجتماعی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.

Use your device to scan and read the article online

Citation Sadeghi Sedeh S, FatorehChy S, Akbarfahimi N, Hosseini SA, Dalvand H, Bakhshi E. Effectiveness of the Fall-Proof Rehabilitation Exercise Software on Light Touch and Vibration Sensory Function in Patients with Diabetic Polyneuropathy. Archives of Rehabilitation. 2026; 26(4):528-551. https://doi.org/10.32598/RJ.26.4.3358.2

https://doi.org/10.32598/RJ.26.4.3358.2

چکیده

هدف پلی‌نوروپاتی دیابتی(DPN) یکی از شایع‌ترین عوارض دیابت نوع ۲ است که با کاهش حس لامسه سطحی و درک ارتعاش همراه بوده و به اختلال تعادل و افزایش خطر سقوط در سالمندان منجر می‌شود. این مطالعه با هدف بررسی اثربخشی یک نرم‌افزار تمرینی توان‌بخشی فال-پروف (پیشگیری از سقوط) بر بهبود عملکرد حسی در سالمندان مبتلا به DPN طراحی شد.

روش بررسی این مطالعه یک کارآزمایی بالینی یک‌سوکور بود که در سال ۱۴۰۴ در بیمارستان صدیقه طاهره اصفهان اجرا شد که در آن ۹۶ بیمار مبتلا به DPN (تأییدشده با پرسش‌نامه غربالگری نوروپاتی میشیگان) به‌صورت تصادفی‌سازی تطبیقی در سه گروه مداخله حضوری، مداخله مجازی (با استفاده از نرم‌افزار) و کنترل تقسیم شدند. گروه‌های مداخله، تمرینات فال-پروف را به‌مدت ۸ هفته (۲ جلسه در هفته) به‌صورت حضوری یا مجازی انجام دادند، درحالی‌که گروه کنترل تنها مراقبت‌های متداول را دریافت کرد. عملکرد حسی (حس لامسه در نواحی متاتارس سوم، متاتارس پنجم و هالوس و حس ارتعاش در هالوس) در چهار زمان‌بندی (پیش از مداخله، پس از مداخله، ۲ ماه و ۳ ماه پس از مداخله) ارزیابی شد. داده‌ها با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک فریدمن، ویلکاکسون و من-ویتنی تحلیل شدند.

یافته‌ها نتایج نشان داد هر دو گروه مداخله (حضوری و مجازی) بهبود معنی‌داری در تمام شاخص‌های حسی نشان دادند ($P<0/05$). بهبود در نواحی کلیدی متاتارس پنجم و هالوس که نقش محوری در تعادل و راه‌رفتن دارند، برجسته‌تر بود. در مقایسه با گروه کنترل، گروه مجازی بهبود بیشتری در حس لامسه متاتارس پنجم (۱/۸۰ واحد) و هالوس (۱/۲۲ واحد) و حس ارتعاش (۰/۳۶ واحد) نشان دادند. همچنین، اثرات مداخله در گروه مجازی تا ۳ ماه پس از پایان تمرینات پایدار ماند، درحالی‌که در گروه کنترل، کاهش معنی‌داری در عملکرد حسی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری تمرینات فال-پروف، به‌ویژه در قالب یک نرم‌افزار توان‌بخشی تعاملی به بهبود معنی‌دار، هدفمند و پایدار حس لامسه و ارتعاش در سالمندان مبتلا به DPN منجر می‌شود. این یافته‌ها، پتانسیل بالای مداخلات دیجیتال‌محور را در بازتوانی حسی، کاهش خطر سقوط در جمعیت‌های پرخطر تأیید می‌کند و کاربرد بالینی آن را در برنامه‌های توان‌بخشی خانگی پشتیبانی می‌نماید.

کلیدواژه‌ها نوروپاتی محیطی دیابتی، تمرینات فال-پروف، توان‌بخشی دیجیتال، حس لامسه، حس ارتعاش

تاریخ دریافت: ۰۸ مهر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۰ آبان ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۱۱ دی ۱۴۰۴

* **نویسنده مسئول:**
سعید فطوره‌چی
نشانی: تهران، دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی، دانشکده علوم توان‌بخشی، گروه کاردرمانی.
تلفن: ۳۷۶۸۸۴۹ (۹۱۲) ۹۸+
رایانامه: saeidfatorehchy@yahoo.com

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

دیابت نوع۲ یک بیماری متابولیک مزمن و پیش‌رونده است که با هایپرگلیسمی ناشی از مقاومت به انسولین و اختلال در عملکرد سلول‌های بتای پانکراس مشخص می‌شود. براساس گزارش فدراسیون بین‌المللی دیابت[1] (IDF)، بیش از ۵۰۰ میلیون نفر در سراسر جهان به این بیماری مبتلا هستند و پیش‌بینی می‌شود این رقم تا سال ۲۰۴۵ به ۷۰۰ میلیون نفر افزایش یابد [۱]. این بیماری به‌ویژه در جمعیت‌های سالمند در حال رشد، مانند جامعه ایران، بار سنگینی بر نظام‌های سلامت، خانواده‌ها و بیماران وارد می‌کند و چالش‌های بالینی، اجتماعی و اقتصادی قابل‌توجهی را به همراه دارد [۲].

یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین عوارض مزمن دیابت، نوروپاتی محیطی دیابتی[2] است که در ۳۰ تا ۵۰ درصد از بیماران دیده می‌شود و با آسیب پیش‌رونده به فیبرهای عصبی حسی، حرکتی و خودکار همراه است. علائم حسی این عارضه شامل کاهش حس لامسه سطحی[3]، اختلال در حس عمقی[4] و افزایش آستانه درک ارتعاش[5] است که همگی به اختلال در تعادل، راه‌رفتن و افزایش خطر سقوط در سالمندان منجر می‌شوند [۳]. در همین راستا، مطالعه صادقی و همکاران نشان داده است بیماران مبتلا به دیابت، به‌ویژه آن‌هایی که دچار نوروپاتی هستند، امتیاز پایین‌تری در مقیاس تعادل برگ و قدرت عضلانی اندام تحتانی، ویژه عضلات دیستال مچ پا نسبت به گروه شاهد کسب می‌کنند. این ضعف عضلانی به‌طور مستقیم با اختلال تعادل عملکردی، تغییر الگوی راه‌رفتن و افزایش خطر سقوط مرتبط است [۴].

باتوجه‌به عدم وجود درمان دارویی مؤثر برای بازگرداندن کامل عملکرد عصبی در پلی نوروپاتی دیابتی، تمرکز مداخلات بالینی به‌طور فزاینده‌ای بر توان‌بخشی حسی-حرکتی معطوف شده است. مطالعات مروری و کارآزمایی‌های بالینی نشان داده‌اند تقویت عضلات اندام تحتانی، به‌ویژه عضلات مچ پا، می‌تواند توزیع فشار کف پا، تحرک مفصلی، سرعت راه‌رفتن، سرعت هدایت عصبی و عملکرد حسی محیطی را بهبود بخشند [۵، ۶]. همچنین، تمرینات انعطاف‌پذیری و مقاومتی مچ پا نه‌تنها شدت نوروپاتی و سرعت راه‌رفتن را بهبود می‌بخشند، بلکه میزان عود زخم دیابتی کف پا را کاهش داده و درنهایت به حفظ تعادل و پیشگیری از سقوط کمک می‌کنند [۷-۱۰]. در این زمینه، مطالعات متعددی تأکید کرده‌اند تمرینات هدفمند مربوط به پا، به‌ویژه زمانی که تحت نظارت درمانگر و همراه با پیگیری منظم اجرا شوند، می‌توانند به‌طور مؤثری علائم DPN را کاهش دهند [۱۱، ۱۲]، درک ارتعاش را بهبود بخشند [۱۳]، تحرک مفصلی پا و مچ پا را بازیابی کنند [۱۴]، توزیع فشار کف پا را در طول راه‌رفتن بهینه سازند [۱۵] و درنهایت به افزایش قدرت و عملکرد پا و کاهش خطر سقوط منجر می‌گردند [۱۶، ۱۷].

در میان این مداخلات، تمرینات فال-پروف به‌عنوان یک رویکرد جامع و ساختاریافته برای پیشگیری از سقوط در سالمندان طراحی شده‌اند [۱۸]. این تمرینات که ترکیبی از مؤلفه‌های تعادلی استاتیک و دینامیک، تحریک حسی لامسه و تمرینات تقویتی هستند، با هدف تحریک فیبرهای حسی محیطی و بهبود عملکردهای پایه‌ای تعادلی اجرا می‌شوند [۱۹].

در یک مطالعه مرور نظام‌مند اخیر عنوان شده است اجرای حداقل ۸ هفته‌ای این تمرینات (۳ جلسه ۴۰ تا ۵۰ دقیقه‌ای در هفته) در سالمندان بالای ۶۰ سال، به بهبود تعادل عملکردی، کاهش ترس از سقوط و افزایش توانایی انجام فعالیت‌های روزمره منجر می‌شود. بنابراین، تمرینات فال-پروف به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود تعادل ایستا و پویا و پیشگیری از سقوط در سالمندان مطرح شده‌اند و پیشنهاد می‌شود پس از ارزیابی اولیه و آموزش کافی به‌عنوان برنامه‌ای پیشگیرانه و درمانی مورد استفاده قرار گیرند [۲۰].

مطالعات مختلفی نیز اثربخشی این تمرینات را در جمعیت سالم سالمندان تأیید کرده‌اند؛ به‌عنوان‌مثال، پژوهش خازنین و همکاران نشان داد اجرای ۸ هفته تمرینات فال-پروف به کاهش معنی‌دار فراوانی سقوط و بهبود راهبردهای قامتی در سالمندان منجر می‌شود. همچنین، مطالعات دیگری افزایش حساسیت به تماس پا و بهبود درک ارتعاش پس از اجرای تمرینات تعادلی را گزارش کرده‌اند [۲۱]. این تمرینات با افزایش بازخوردهای حسی محیطی، مسیرهای عصبی را فعال‌سازی کرده و به بهبود حس عمقی کمک می‌کنند

بااین‌حال، بررسی دقیق منابع موجود نشان می‌دهد اغلب مطالعات انجام‌شده در زمینه تمرینات فال-پروف بر جمعیت‌های سالم یا کم‌خطر متمرکز بوده‌اند و توجه کمی به سالمندان مبتلا به پلی‌نوروپاتی دیابتی که یکی از پرخطرترین گروه‌ها از نظر زمین خوردن و عوارض نوروپاتیک هستند، شده است. علاوه‌براین، تمرینات فال-پروف عمدتاً در محیط‌های بالینی یا گروهی و به‌صورت حضوری اجرا شده‌اند، اما این تمرینات هیچ بستر ساختاریافته‌ای برای اجرای خانگی یا دیجیتال آن‌ها در دسترس نبوده است. همچنین، منابع موجود فاقد ویدیوهای آموزشی تعاملی و سیستم‌های بازخورد لحظه‌ای هستند که اطمینان از اجرای صحیح تمرینات توسط کاربران را فراهم کنند. مهم‌تر از همه، تاکنون هیچ نرم‌افزار تعاملی و اختصاصی برای اجرای تمرینات فال-پروف در جمعیت مبتلا به نوروپاتی دیابتی طراحی یا ارزیابی نشده است، درحالی‌که نیاز به چنین ابزاری در این گروه بیماران بسیار حیاتی است [۲۲].

بنابراین، یک خلأ جدی پژوهشی و کاربردی در زمینه طراحی و ارزیابی مداخلات دیجیتال‌محور برای بهبود حس‌های پایه، به‌ویژه حس لامسه سطحی و درک ارتعاش، در سالمندان مبتلا به نوروپاتی

1. International Diabetes Federation (IDF)
2. Diabetic Peripheral Neuropathy (DPN)
3. Light Touch Sensation
4. Proprioception
5. Vibration Perception Threshold (VPT)

دیابتی وجود دارد. طراحی یک نرم‌افزار تمرینی که بتواند تمرینات فال-پروف را به‌صورت استاندارد، تعاملی و قابل‌پیگیری ارائه دهد، می‌تواند گامی مهم در جهت ارتقای ایمنی، استقلال عملکردی و کیفیت زندگی این بیماران باشد.

براین‌اساس، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثربخشی یک نرم‌افزار تمرینی مبتنی بر فال-پروف بر بهبود عملکرد حس لامسه سطحی و درک ارتعاش در سالمندان مبتلا به پلی‌نوروپاتی دیابتی انجام شد. این پژوهش در پی آن است پاسخی عملی و علمی به یکی از مهم‌ترین نیازهای نوظهور در حوزه توان‌بخشی دیجیتال برای جمعیت سالمند دیابتی ارائه دهد و زمینه را برای توسعه مداخلات مقرون‌به‌صرفه، مقیاس‌پذیر و کارآمد در محیط‌های خانگی فراهم کند. فرضیه اصلی این مطالعه آن است که استفاده منظم از نرم‌افزار تمرینی مبتنی بر «فال-پروف» می‌تواند به بهبود معنی‌دار در عملکرد حسی لامسه سطحی و درک ارتعاش در سالمندان مبتلا به پلی‌نوروپاتی دیابتی منجر شود، چراکه تحریک حسی تکرارشونده و هدفمند، قادر است نوروپلاستی و بازتوانی عملکردی در سیستم عصبی محیطی را تسهیل کند.

روش مطالعه

این مطالعه کارآزمایی بالینی تصادفی یک‌سوکور، با هدف بررسی اثربخشی نرم‌افزار تمرینات توان‌بخشی فال-پروف بر بهبود عملکرد حس لامسه سطحی و درک ارتعاش در سالمندان مبتلا به پلی‌نوروپاتی دیابتی، در ۲ فاز طراحی نرم‌افزار و اجرای مداخله انجام شد.

فاز اول

در فاز اول، نرم‌افزار تمرینات فال-پروف در چهار مرحله طراحی و توسعه یافت:

تولید ویدئوهای آموزشی

تمرینات فال-پروف که شامل تمرینات تعادلی ایستا و پویا، تقویت عضلات مچ پا و تحریک حسی کف پا بود با هماهنگی خانم دبرا رز (طراح اصلی تمرینات توان‌بخشی فال-پروف) [۲۳] به‌صورت ویدئوهای آموزشی کوتاه (هر کدام حداکثر ۱۰ دقیقه) ضبط و تدوین شدند.

اعتبارسنجی محتوا

روایی محتوایی و صوری ویدئوها با استفاده از شاخص‌های CVR (حداقل مقدار قابل‌قبول= ۰/۷۸) و CVI (حداقل مقدار قابل‌قبول= ۰/۷۹) و با مشارکت گروه خبرگان متشکل از ۸ کاردرمانگر با سابقه حداقل ۵ سال کار بالینی، براساس سه معیار اصلی ضرورت محتوا، وضوح بیان و ارتباط با اهداف توان‌بخشی نوروپاتی دیابتی بررسی و تأییدشدند.

توسعه‌فنی

نرم‌افزار با استفاده از زبان‌های Java (اندروید) و PHP/MySQL (بک‌اند) توسعه یافت و قابلیت‌هایی مانند احراز هویت دو مرحله‌ای، استریم ویدئو، تالار گفت‌وگو، یادآوری خودکار جلسات و ثبت بازخورد کاربران در آن تعبیه شد.

مطالعه‌پایلوت

نسخه اولیه نرم‌افزار بر روی ۶ بیمار مبتلا به DPN آزمایش شد. نتایج نشان داد نرم‌افزار از نظر سهولت استفاده، وضوح دستورالعمل‌ها و زمان‌بندی جلسات مناسب است. پس از اعمال اصلاحات جزئی، نسخه نهایی آماده استفاده در کارآزمایی بالینی شد.

فاز دوم

در فاز دوم مطالعه (مداخله بالینی)، بیماران مبتلا به دیابت نوع۲ که به کلینیک دیابت بیمارستان صدیقه طاهره اصفهان مراجعه کرده بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. باتوجه‌به شیوع تخمینی ۳۰ درصدی نوروپاتی محیطی دیابتی (DPN) در جمعیت دیابتی [۲۴]، و با در نظر گرفتن دقت ۵ درصد و سطح اطمینان ۹۵ درصد، حجم نمونه موردنیاز برای غربالگری اولیه حدود ۲۸۰ نفر برآورد شد.

پس از غربالگری اولیه با استفاده از پرسش‌نامه میشیگان (MNSI) و اعمال معیارهای ورود و خروج، درنهایت ۹۶ بیمار واجد شرایط انتخاب شدند. این افراد به‌صورت تصادفی‌سازی تطبیقی[6] در سه گروه ۳۲ نفره تقسیم شدند: گروه مداخله حضوری، گروه مداخله مجازی (با استفاده از نرم‌افزار فال-پروف تهیه‌شده در مطالعه) و گروه کنترل.

تخصیص شرکت‌کنندگان به گروه‌ها توسط یک پژوهشگر مستقل و با استفاده از الگوریتم [۲۵] انجام شد تا تعادل بین گروه‌ها از نظر دو متغیر کلیدی «مدت ابتلا به دیابت» و «شدت DPN» حفظ شود. این الگوریتم، یک روش تصادفی‌سازی تطبیقی است که به‌گونه‌ای طراحی شده تا تفاوت بین گروه‌ها از نظر متغیرهای مداخله‌گر (در این مطالعه: مدت ابتلا به دیابت و شدت DPN) به حداقل برسد (فرمول شماره ۱).

به‌منظور حفظ کورسازی یک‌طرفه، ارزیابان و تحلیل‌گران آماری از تخصیص گروهی شرکت‌کنندگان بی‌اطلاع بودند.

1. $$n = \frac{\left(z_{1-\frac{\alpha}{2}} + z_{1-\beta}\right)^2 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{d^2} = \frac{(1.96+0.84)^2 \left(2.46^2 + 2.78^2\right)}{(16.21-14.37)^2} = 31.91 = 32$$

6. Covariate Adaptive Randomization

معیارهای ورود

۱. سن ۶۰ سال و بالاتر (باتوجه‌به این‌که دیابت نوع۲ معمولاً از دهه چهارم یا پنجم زندگی آغاز می‌شود و بروز نوروپاتی دیابتی اغلب چندین سال پس از شروع بیماری رخ می‌دهد، انتخاب این بازه سنی برای تمرکز بر جمعیت هدف با احتمال بالاتر ابتلا به DPN بود [۲۶]؛

۲. تشخیص قطعی دیابت نوع۲ و وجود پرونده پزشکی فعال در بیمارستان صدیقه طاهره اصفهان (شرکت‌کننده طی ۶ ماه گذشته حداقل ۱ بار به کلینیک دیابت بیمارستان صدیقه طاهره مراجعه کرده و اطلاعات تشخیصی و درمانی مرتبط با دیابت نوع ۲ و وضعیت کنترل بیماری در سامانه ثبت الکترونیک سلامت بیمارستان موجود بوده است. این معیار برای اطمینان از صحت تشخیص، پیگیری درمان و دسترسی به داده‌های بالینی معتبر جهت ارزیابی اولیه شرکت‌کنندگان در نظر گرفته شد)؛

۳. وجود نشانه‌های نوروپاتی محیطی دیابتی (DPN) براساس پرسش‌نامه استاندارد میشیگان (MNSI) با کسب امتیاز ≥۲ [۲۷]؛

۴. توانایی راه‌رفتن و حفظ تعادل بدون استفاده از وسایل کمکی، با کسب امتیاز بیش از ۲۰ در مقیاس تعادل برگ (BBS) [۲۸]؛

۵. دسترسی به تلفن هوشمند برای شرکت‌کنندگان گروه مداخله مجازی؛

۶. مشارکت فعال در حداقل ۹۰ درصد جلسات و تمرینات در گروه‌های مداخله؛

۷. کنترل نسبی بیماری دیابت، با سطوح HbA1c کمتر از ۸ درصد و فشار خون کمتر از ۹۰/۱۴۰ mmHg؛

۸. توانایی ارائه رضایت آگاهانه و همکاری در طول دوره مطالعه.

معیارهای خروج

-بروز زخم فعال کف پا، انجام جراحی یا آرتروپلاستی اندام تحتانی؛

-تشخیص بیماری‌های عصبی یا اختلالات شناختی شدید؛

-دریافت هم‌زمان خدمات فیزیوتراپی یا کاردرمانی مشابه؛

-بروز عوارض عروقی یا رتینوپاتی پیشرفته؛

-عدم تمایل به ادامه همکاری پس از ۳ بار پیگیری.

گروه‌های مطالعه

گروه مداخله حضوری

تمرینات فال-پروف را ۲ جلسه در هفته (هر جلسه ۴۰ دقیقه + ۱۰ دقیقه استراحت) به‌صورت حضوری و تحت نظارت مستقیم کاردرمانگر در کلینیک اجرا کردند.

گروه مداخله مجازی

پس از یک جلسه آموزش حضوری، تمرینات را از طریق نرم‌افزار در منزل انجام دادند. این نرم‌افزار اندروید بر روی گوشی همراه افراد نصب می‌شد و امکان بازبینی ویدئوها، ثبت پیشرفت، دریافت یادآوری خودکار و ارسال پیام به درمانگر را فراهم می‌کرد. برای اجرای تمرینات در منزل افراد به تجهزات خاصی نیاز نداشتند و در صورت عدم ورود به نرم‌افزار بیش از ۵ روز، پیامک یادآوری ارسال و محقق پیگیری می‌کرد.

گروه کنترل

تنها مراقبت‌های متداول دیابت شامل دارودرمانی، رژیم غذایی و آموزش سبک زندگی سالم را دریافت کردند و هیچ مداخله تمرینی دریافت نکردند. تمام شرکت‌کنندگان در سه گروه به‌مدت ۸ هفته تحت مداخله و پیگیری قرار گرفتند.

تمرینات فال-پروف

تمرینات فال-پروف به‌صورت ۸ هفته‌ای پلکانی طراحی شده بود تا شدت و پیچیدگی تمرینات به‌تدریج افزایش یابد.

هفته اول

تمرینات کنترل مرکز ثقل، انتقال وزن، انعطاف‌پذیری و مقاومت اندام تحتانی در حالت نشسته (۱۲ بار تکرار، ۴ تا ۵ ست، انقباض ایزومتریک ۶ ثانیه) بود.

هفته دوم

تمرینات کنترل مرکز ثقل، انعطاف‌پذیری، راه‌رفتن در حالت نشسته و ایستاده (۱۲ بار تکرار، ۴ تا ۵ ست، انقباض ایزومتریک ۶ ثانیه)،

هفته سوم

تمرینات انتقال بدن از زمین به حالت ایستاده، قدرتی و تعادلی ایستا روی یک پا (۱۵ تکرار، انقباض ایزومتریک ۸ ثانیه)،

هفته چهارم

تمرینات کنترل مرکز ثقل در حالت ایستاده، انتقال بدن از زمین، راه‌رفتن با کنترل اشیاء (۱۵ تکرار، انقباض ایزومتریک ۸ ثانیه)،

هفته پنجم

تمرینات چندحسی، حرکتی و جابه‌جایی و هماهنگی چشم و سر (۲۰ بار تکرار، انقباض ایزومتریک ۱۰ ثانیه)،

هفته ششم

تمرینات اختلال در تعادل، انتقال بدن از زمین، تمرینات متنوع بهبوددهنده الگوی گام‌برداری (۲۰ بار تکرار، انقباض ایزومتریک ۱۰ ثانیه)،

هفته هفتم

تمرینات کششی، کنترل مرکز ثقل، چندحسی، تمرین راهبرد قامتی (۲۵ بار تکرار، انقباض ایزومتریک ۱۲ ثانیه)،

هفته هشتم

تمرینات حرکتی و جابه‌جایی با یک پا با کنترل توسط اشیاء، کنترل مرکز ثقل و بهبوددهنده الگوی گام‌برداری (۲۵ بار تکرار، انقباض ایزومتریک ۱۲ ثانیه) بود [۱۹، ۲۳].

تمام ارزیابی‌ها توسط یک کاردرمانگر آموزش‌دیده و کور نسبت به گروه‌ها در چهار زمان‌بندی، پیش از مداخله، بلافاصله پس از مداخله (هفته ۸)، ۲ ماه پس از مداخله و ۳ ماه پس از مداخله انجام شد.

حس لامسه سطحی

با استفاده از مونوفیلامان ۱۰ گرمی Semmes-Weinstein در سه ناحیه کلیدی کف پا (متاتارس سوم، متاتارس پنجم و هالوس) سنجیده شد [۲۹، ۳۰].

حس ارتعاش

با استفاده از دیاپازون ۱۲۸ هرتزی که روی فالانکس دیستال هالوس قرار داده شد، زمان (برحسب ثانیه) از لحظه شروع تا زمانی که بیمار دیگر ارتعاش را احساس نکند، ثبت شد [۳۱].

تعادل عملکردی

با استفاده از مقیاس تعادل برگ (BBS)[7] ارزیابی شد. این مقیاس، شامل ۱۴ سؤال (فعالیت‌های متداول زندگی روزانه) است و هر سؤال براساس مقیاس ۵ درجه‌ای، ترتیبی از (۰) تا (۴) است و براساس کیفیت یا زمان اختصاص‌یافته برای اتمام کار ارزیابی می‌شود. درجه (۰) نشان‌دهنده ضرورت نیاز به حداکثر کمک و درجه (۴) نشان‌دهنده استقلال فرد در انجام کارها است. حداکثر امتیاز ۵۶ است که از مجموع امتیازات بخش‌های مختلف تست به دست می‌آید. امتیاز ۴۱ تا ۵۶ به معنای تعادل زیاد است که در آن خطر ازدست‌دادن تعادل و سقوط بیمار کم است. امتیاز ۲۱ تا ۴۰ نشان‌دهنده تعادل متوسط با احتمال متوسط خطر سقوط و امتیاز بین (۰) تا (۲۰) به معنای تعادل کم و احتمال زیاد خطر سقوط است. پایایی هر بخش از مقیاس برگ برابر با ۹۸/۰، پایایی هر بخش آن برابر با ۹۹/۰و سازگاری درونی آن برابر با ۹۶/۰گزارش شده است [۳۲].

جهت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶، پس از بررسی چگونگی توزیع داده‌ها با آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف[8] و شاپیرو-ویلک[9] برای مقایسه بین گروه‌ها از آزمون کروسکال-والیس[10]، برای بررسی تغییرات درون‌گروهی در طول زمان از آزمون فریدمن[11] و برای مقایسه زوجی بین گروه‌ها از آزمون من-ویتنی همراه با اصلاح بونفرونی[12] استفاده شد. سطح معنی‌داری آماری برای تمام تحلیل‌ها P<۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

در این کارآزمایی بالینی یک‌سوکور، ۹۶ بیمار واجد شرایط به‌صورت تصادفی در سه گروه ۳۲ نفره شامل مداخله حضوری، مداخله مجازی (با استفاده از نرم‌افزار) و کنترل تقسیم شدند. سه گروه از نظر متغیرهای زمینه‌ای شامل میانگین سن (به‌ترتیب ۶۶/۹۳، ۶۷/۵۳، ۶۷/۹۶ سال؛ P=۰/۸۴۸)، شاخص توده بدنی (به‌ترتیب ۲۴/۵۵، ۲۵/۲۲، ۲۴/۸۶ واحد؛ P=۰/۷۷۲) و مدت ابتلا به دیابت (سال) (P=۰/۵۶۳) همسان بودند.

همچنین سه گروه از نظر سطح هموگلوبین گلیکولیزه (HbA1c) (به‌ترتیب ۶/۸۳، ۶/۷۰ ، ۶/۹۳؛ P=۰/۲۷۱)، قند خون ناشتا (میلی‌گرم در دسی‌لیتر) (P=۰/۹۳۸)، فشار خون (میلی‌متر جیوه) (P=۰/۷۰۳) شدت نوروپاتی براساس MNSI (۸/۸۱، ۸/۲۸، ۸/۳۴؛ P=۰/۶۴۹) براساس اطلاعات مندرج در پرونده و معاینه، همسان بودند.

حس ارتعاش

براساس آزمون کروسکال والیس، در پیش‌آزمون بین سه گروه تفاوت معنی‌داری نداشت. (P=۰/۷۵۰) پس از مداخله، هر دو گروه مداخله (حضوری و مجازی) بهبود معنی‌داری در حس ارتعاش نشان دادند (P≤۰/۰۰۲)، درحالی‌که در گروه کنترل کاهش معنی‌داری مشاهده شد (P=۰/۰۰۶) در مقایسه بین

7. Berg Balance Scale (BBS)

8. Kolmogorov-Smirnov
9. Shapiro-Wilk Test
10. Kruskal–Wallis test
11. Friedman test
12. Bonferroni test

گروه‌ها، مداخله مجازی به افزایش ۰/۳۵۹ واحدی و مداخله حضوری به افزایش ۰/۰۲۱ واحدی در حس ارتعاش منجر شد. اگرچه تفاوت بین دو گروه مداخله ازنظر آماری معنی‌دار نبود (P=۰/۱۱۴)، اما گروه مجازی بیشترین بهبود را نشان داد و این بهبود تا ۳ ماه پس از مداخله پایدار ماند **(جدول شماره ۱** و **تصویر شماره ۱)**. براساس آزمون تکرار مشاهدات و تست بونفرونی نتایج مطابق **تصویر شماره ۱ بود.**

اثربخشی مداخله بر حس لامسه سطحی

حس لامسه در متاتارس سوم

براساس آزمون کروسکال والیس، در پیش‌آزمون تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها وجود نداشت (P=۰/۵۳۹). پس از مداخله، گروه مجازی ۰/۹۵۳ واحد و گروه حضوری ۰/۶۷۹واحد بهبود نشان دادند (P<۰/۰۰۱). تفاوت بین دو گروه مداخله معنی‌دار نبود (P=۰/۲۱۰)، اما هر دو به‌طور معنی‌داری از گروه کنترل بهتر بودند **(جدول شماره ۲** و **تصویر شماره ۲)**. براساس آزمون تکرار مشاهدات و تست بونفرونی نتایج مطابق **تصویر شماره ۲ بود.**

حس لامسه در متاتارس پنجم

براساس آزمون کروسکال والیس، این ناحیه که نقش کلیدی در تعادل و راه‌رفتن دارد، بیشترین بهبود را نشان داد. در پیش‌آزمون تفاوتی بین گروه‌ها وجود نداشت (P=۰/۱۰۹). پس از مداخله، گروه مجازی ۱/۸۰۴ واحد و گروه حضوری ۱/۱۷۹ واحد بهبود یافتند (P<۰/۰۰۱). تفاوت بین دو گروه مداخله معنی‌دار بود (P=۰/۰۰۱) و گروه مجازی عملکرد بهتری داشت. این بهبود تا ۳ ماه پس از مداخله پایدار ماند **(جدول شماره ۳** و **تصویر شماره ۳)**. براساس آزمون تکرار مشاهدات و تست بونفرونی، نتایج مطابق **تصویر شماره ۳** بود.

حس لامسه در هالوس

براساس آزمون کروسکال والیس در پیش‌آزمون تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (P=۰/۵۹۱). پس از مداخله، گروه مجازی ۱/۲۱۸ واحد و گروه حضوری ۰/۹۲۹ واحد بهبود نشان دادند (P<۰/۰۰۱). تفاوت بین دو گروه مداخله معنی‌دار نبود (P=۰/۱۱۲)، اما هر دو به‌طور معنی‌داری از گروه کنترل بهتر عمل کردند. بهبود در گروه مجازی تا ۳ ماه پس از مداخله پایدار ماند **(جدول شماره ۴** و **تصویر شماره ۴)**. براساس آزمون تکرار مشاهدات و تست بونفرونی، نتایج مطابق **تصویر شماره ۴ بود.**

بحث

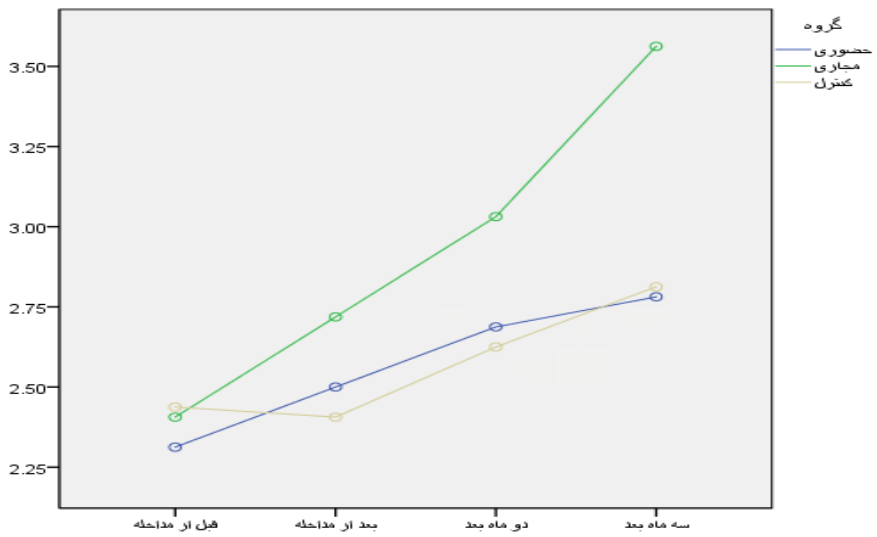
یافته‌های این مطالعه نشان داد اجرای برنامه توان‌بخشی «فال‌پروف» در هر دو قالب حضوری و مجازی، بدون ایجاد عارضه جدی، اثر مثبت و معنی‌داری بر بهبود عملکرد حسی شامل حس لامسه سبک و حس ارتعاش در بیماران مبتلا به نوروپاتی دیابتی داشت. پیش از مداخله، تمامی بیماران دچار اختلال حسی بودند، اما پس از ۸ هفته، بهبود چشمگیری در گروه‌های مداخله، به‌ویژه

جدول ۱. مقایسه حس ارتعاش در سه گروه برحسب زمان (n=۳۲)

گروه	زمان ارزیابی	میانگین±انحراف‌معیار	میانگین رتبه	*مقداراحتمال
حضوری	قبل از مداخله	۲/۳۱±۰/۶۹	۲/۲۷	۰/۰۰۲
	بعد از مداخله	۲/۵۰±۰/۶۷	۲/۴۲	
	۲ ماه بعد	۲/۶۸±۰/۹۳	۲/۶۱	
	۳ ماه بعد	۲/۷۸±۱/۰۹	۲/۷۰	
مجازی	قبل از مداخله	۲/۴۰±۰/۶۶	۲/۰۸	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۷۱±۰/۸۵	۲/۲۷	
	۲ ماه بعد	۳/۰۳±۱/۰۳	۲/۶۶	
	۳ ماه بعد	۳/۵۶±۱/۲۶	۳/۰۰	
کنترل	قبل از مداخله	۲/۴۳±۰/۷۱	۲/۳۶	۰/۰۰۶
	بعد از مداخله	۲/۴۰±۰/۷۱	۲/۳۳	
	۲ ماه بعد	۲/۶۲±۰/۷۹	۲/۵۸	
	۳ ماه بعد	۲/۸۱±۱/۰۲	۲/۷۳	

*آزمون فریدمن

توانبخشی



تصویر ۱. مقایسه تغییرات حس ارتعاش در سه گروه

توانبخشی

در نواحی متاتارس پنجم و هالوس که برای کنترل تعادل و پیشگیری از سقوط نقش کلیدی دارند، مشاهده شد. این تغییرات در گروه مجازی بارزتر از گروه حضوری بود و تا ۳ ماه پس از پایان مداخله پایدار باقی ماند، درحالی‌که در گروه کنترل نه‌تنها بهبودی حاصل نشد، بلکه کاهش عملکرد نیز گزارش گردید.

یافته‌های این مطالعه نشان داد اجرای برنامه توان‌بخشی «فال‌پروف» در هر دو قالب حضوری و مجازی، اثر مثبت و معنی‌داری بر بهبود عملکرد حسی داشت که ازنظر مکانیسمی، بهبود عملکرد حسی می‌تواند به پلاستیسیته عصبی و تقویت ارتباطات سیناپسی در مسیرهای حسی مرتبط باشد. تحریک مکرر کف پا در طول تمرینات، گیرنده‌های مکانورسپتور را فعال کرده و اطلاعات دقیق‌تری را به سیستم عصبی مرکزی منتقل می‌کند. این فرایند به بهبود درک لمسی و ارتعاشی و در نهایت افزایش دقت در تنظیم پاسخ‌های تعادلی منجر می‌شود [۳۳].

جدول ۲. مقایسه حس لمس متاتارس سوم در سه گروه برحسب زمان (n=۳۲)

گروه	زمان ارزیابی	میانگین±انحراف‌معیار	میانگین رتبه	مقدار احتمال*
حضوری	قبل از مداخله	۲/۲۸±۰/۶۸	۲/۱۷	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۵۶±۰/۶۶	۲/۴۴	
	۲ ماه بعد	۲/۶۵±۰/۷۴	۲/۵۳	
	۳ ماه بعد	۳/۰۳±۱/۲۰	۲/۸۶	
مجازی	قبل از مداخله	۲/۴۰±۰/۶۶	۲/۰۸	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۷۸±۰/۹۰	۲/۴۱	
	۲ ماه بعد	۳/۰۰±۰/۹۱	۲/۵۹	
	۳ ماه بعد	۳/۴۳±۱/۲۱	۲/۹۲	
کنترل	قبل از مداخله	۲/۲۱±۰/۷۰	۲/۸۶	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۰۹±۰/۶۴	۲/۷۰	
	۲ ماه بعد	۱/۸۴±۰/۶۷	۲/۳۴	
	۳ ماه بعد	۱/۶۵±۰/۷۰۰	۲/۰۹	

*آزمون فریدمن

توانبخشی

جدول ۳. مقایسه حس لمس متاتارس پنجم در سه گروه بر حسب زمان (n=۳۲)

گروه	زمان ارزیابی	میانگین	میانگین±انحراف‌معیار	میانگین رتبه	مقدار احتمال*
حضوری	قبل از مداخله	۲/۹۰	۲/۹۰±۰/۷۳	۲/۲۷	۰/۰۴۵
	بعد از مداخله	۳/۰۶	۳/۰۶±۱/۱۶	۲/۲۵	
	۲ ماه بعد	۳/۴۶	۳/۴۶±۱/۲۱	۲/۶۳	
	۳ ماه بعد	۳/۷۱	۳/۷۱±۱/۳۰	۲/۸۶	
مجازی	قبل از مداخله	۳/۳۱	۳/۳۱±۱/۳۵	۲/۰۵	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۳/۷۸	۳/۷۸ ±۱/۲۳	۲/۳۳	
	۲ ماه بعد	۴/۰۳	۴/۰۳±۱/۱۴	۲/۵۸	
	۳ ماه بعد	۴/۵۳۸	۴/۵۳۸±۱/۰۱	۳/۰۵	
کنترل	قبل از مداخله	۲/۷۸	۲/۷۸±۰/۹۴	۳/۲۵	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۰۹	۲/۰۹±۰/۶۴	۲/۵۵	
	۲ ماه بعد	۱/۸۴	۱/۸۴±۰/۶۷	۲/۲۲	
	۳ ماه بعد	۱/۷۱	۱/۷۱±۱/۰۵	۱/۹۸	

*آزمون فریدمن

توانبخشی

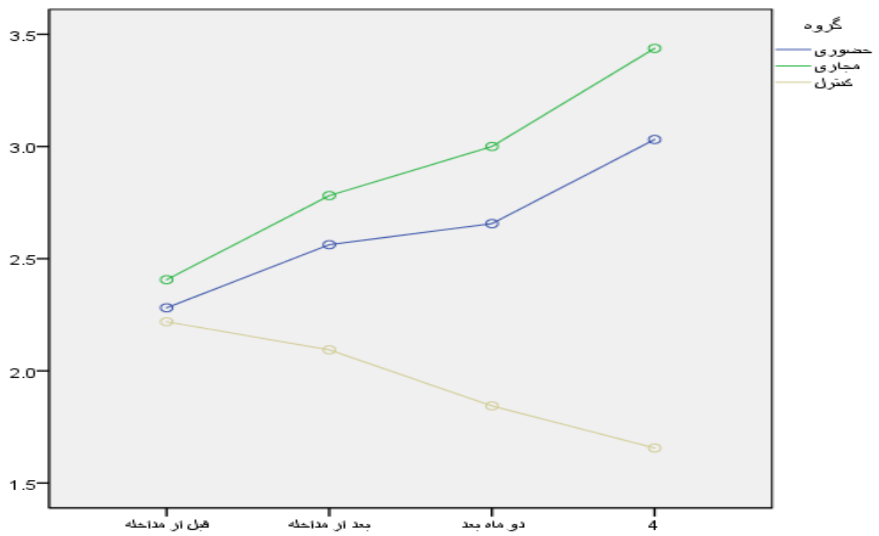
ازطرف‌دیگر، بهبود در گروه مجازی نه‌تنها از نظر اندازه اثر بزرگ‌تر بود، بلکه تا ۳ ماه پس از پایان مداخله نیز پایدار ماند. این برتری قابل‌توجه، علی‌رغم یکسان‌بودن تقریبی مدت و تعداد جلسات تمرینی بین دو گروه، می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ذاتی محیط دیجیتال و طراحی تعاملی نرم‌افزار باشد. نرم‌افزار مورداستفاده فراتر از یک پلتفرم پخش ویدئو عمل کرده و با ارائه بازخورد لحظه‌ای، یادآوری خودکار جلسات و ثبت پیشرفت فردی، شرایطی برای یادگیری حسی-حرکتی پایدار فراهم آورد. مطالعات نشان داده‌اند تحریک حسی هدفمند و تکرارشونده، حتی در حجم تمرینی برابر، اگر همراه با تقویت رفتاری و انگیزش

جدول ۴. مقایسه حس لمس هالوس در سه گروه بر حسب زمان (n=۳۲)

گروه	زمان ارزیابی	میانگین±انحراف‌معیار	میانگین رتبه	مقدار احتمال*
حضوری	قبل از مداخله	۲/۳۱±۰/۶۹	۱/۹۴	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۶۵±۰/۵۴	۲/۳۱	
	۲ ماه بعد	۳/۱۵±۰/۸۰	۲/۸۰	
	۳ ماه بعد	۳/۴۶±۱/۳۶	۲/۹۵	
مجازی	قبل از مداخله	۲/۴۶±۰/۶۷	۱/۷۵	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۲/۸۱±۰/۴۷	۲/۰۹	
	۲ ماه بعد	۳/۴۶±۰/۸۰	۲/۸۶	
	۳ ماه بعد	۴/۰۰±۱/۳۹	۳/۳۰	
کنترل	قبل از مداخله	۲/۳۱±۰/۷۳	۳/۰۵	۰/۰۰۱
	بعد از مداخله	۱/۹۳±۰/۶۶	۲/۴۲	
	۲ ماه بعد	۲/۰۶±۰/۶۱	۲/۶۳	
	۳ ماه بعد	۱/۵۶±۰/۸۴	۱/۹۱	

*آزمون فریدمن

توانبخشی



تصویر ۲. مقایسه تغییرات حس لمس متاتارس سوم در سه گروه

توانبخشی

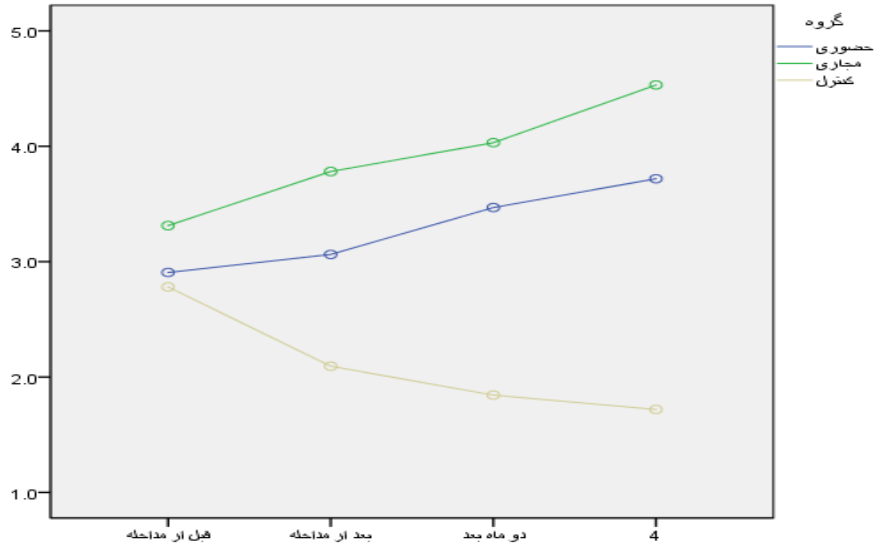
درونی باشند مؤثرتر عمل خواهندکرد [۳۴، ۳۵].

در گروه حضوری، اگرچه جلسات تحت نظارت مستقیم بودند، اما بین جلسات هیچ سازوکاری برای تشویق به تمرین خانگی یا پایش رفتار وجود نداشت، درحالی‌که نرم‌افزار به‌صورت پیوسته کاربر را درگیر فرآیند توان‌بخشی نگه داشت.

همچنین، محیط خانگی و آشنا در گروه مجازی ممکن است به کاهش استرس شناختی و فیزیولوژیک کمک کرده باشد. شواهد نشان می‌دهد محیط‌های بالینی یا حضور درمانگر می‌تواند در برخی سالمندان، به‌ویژه مبتلا به بیماری‌های مزمن، باعث افزایش اضطراب و کاهش تمرکز حسی شود [۳۳]. درمقابل، انجام تمرینات در محیط آرام و شخصی، امکان پردازش عمیق‌تر بازخوردهای حسی را فراهم می‌کند و از این طریق، القای نوروپلاستیسیته در مسیرهای حسی-محیطی و قشری را تسهیل می‌نماید [۳۶].

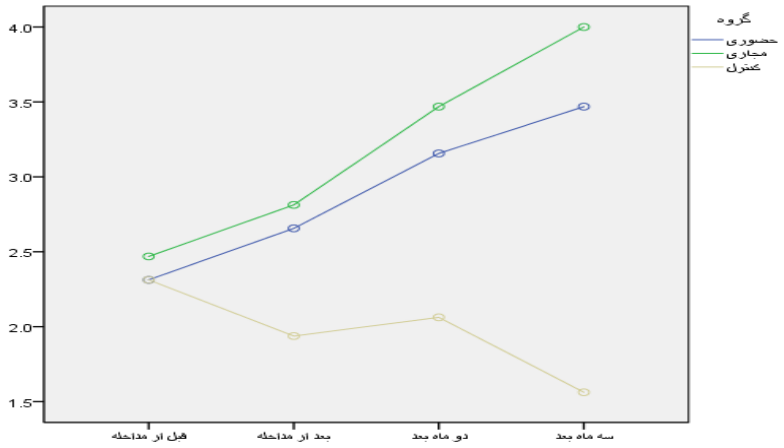
ازسوی‌دیگر، طراحی پلکانی و تدریجی تمرینات در نرم‌افزار، همراه با امکان بازنگری نامحدود ویدئوها، اجازه داد شرکت‌کنندگان بتوانند سرعت یادگیری خود را شخصی‌سازی کنند. این ویژگی، به‌ویژه در جمعیت سالمند با تنوع بالا در عملکرد شناختی و حسی، می‌تواند نقش کلیدی در تثبیت یادگیری داشته باشد [۳۴].

در مقابل، گروه کنترل نه‌تنها بهبودی نشان نداد، بلکه کاهش معنی‌داری در عملکرد حسی داشت که با پیشرفت طبیعی DPN



تصویر ۳. مقایسه تغییرات حس لمس متاتارس پنجم در سه گروه

توانبخشی



تصویر ۴. مقایسه تغییرات حس لمس هالوس در سه گروه

توانبخشی

در صورت عدم مداخله همسو است.

این یافته‌ها با مطالعات متعددی همسو است. به‌عنوان‌مثال، باب و همکاران نشان دادند تمرینات تقویتی عضلات کف پا همراه با تحریک حسی به بهبود حس لامسه و تعادل در بیماران دیابتی منجر شد [۳۷]. همچنین، آتری و همکاران گزارش کردند تمرینات عملکردی و آموزش‌های حسی، حس ارتعاش و ایمنی حرکتی بیماران را بهبود می‌بخشند [۳۸]. خورشید و همکاران نیز اثر مثبت تمرینات ترکیبی بر حس لامسه و تعادل بیماران دیابتی را تأیید کردند [۳۴]. مطالعه فنگ و همکاران نیز نشان داد یک برنامه توان‌بخشی هوشمند، حس ارتعاش و اعتمادبه‌نفس حرکتی را در بیماران نوروپاتیک بهبود می‌دهد [۳۵]. این شواهد، یافته‌های مطالعه حاضر را تقویت می‌کنند و بر نقش تحریک هدفمند کف پا در بهبود عملکرد حسی تأکید دارند.

بااین‌حال، نتایج برخی پژوهش‌ها با یافته‌های ما همسو نبوده است. برای‌مثال، ادو و همکاران در یک کارآزمایی بالینی بزرگ نشان دادند اجرای یک برنامه تمرینی ترکیبی شامل تمرینات هوازی و مقاومتی، اگرچه تعادل و عملکرد راه رفتن را بهبود بخشید، اما تغییر معنی‌داری در حس لامسه یا آستانه ارتعاش ایجاد نکرد [۳۹]. همچنین، کالاقان و همکاران گزارش کردند مداخلات تعادلی و تقویتی به کاهش خطر سقوط منجر شد، اما هیچ بهبودی در حس عمقی یا تماسی مشاهده نشد [۴۰]. مارگسترن و همکاران نیز در بیماران با نوروپاتی شدید نشان دادند حتی پس از ۶ ماه تمرینات توان‌بخشی ساختاریافته، تغییر قابل‌توجهی در پارامترهای نوروفیزیولوژیک یا حس لامسه ایجاد نشد [۴۱].

تفاوت میان نتایج مطالعه حاضر و پژوهش‌های غیرهمسو می‌تواند ناشی از چند عامل باشد:

-نخست، شدت بیماری و مرحله نوروپاتی در جمعیت‌های موردمطالعه متفاوت بوده است. در مطالعه حاضر، شرکت‌کنندگان دارای نوروپاتی خفیف تا متوسط بودند، درحالی‌که مطالعاتی مانند مارگسترن و همکاران بیمارانی با نوروپاتی پیشرفته و آسیب عصبی شدید (تأییدشده با معیارهای نوروفیزیولوژیک) را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند حتی پس از ۶ ماه تمرینات ساختاریافته، بهبود قابل‌توجهی در حس لامسه یا آستانه ارتعاش مشاهده نشد [۴۱].

-دوم، نوع مداخله و تمرکز برنامه‌ها عامل تعیین‌کننده است. برخی مطالعات، مانند مطالعه ادو و همکاران عمدتاً بر تمرینات هوازی و تغییر سبک زندگی تمرکز داشتند و هرچند تعادل و عملکرد حرکتی را بهبود بخشیدند، اما تأثیر معنی‌داری بر حس لامسه یا درک ارتعاش نداشتند [۳۹]. همچنین، کالاقان و همکاران در یک مرور نظام‌مند نشان دادند مداخلات مبتنی صرفاً بر کنترل گلوکز یا تمرینات عمومی، بدون تحریک حسی هدفمند، نمی‌توانند عملکرد حسی محیطی را بازیابی کنند [۴۰]. درمقابل، مطالعه حاضر با تلفیق تمرینات تعادلی، تقویتی و تحریک حسی مستقیم کف پا (به‌ویژه در نواحی متاتارس پنجم و هالوس)، شرایطی برای القای نوروپلاستیسیته حسی فراهم آورد.

-سوم، مدت‌زمان مداخله و پیگیری نیز اهمیت دارد. مطالعاتی با دوره‌های کوتاه‌مدت (مثلاً ۶ هفته) ممکن است فرصت کافی برای القای تغییرات عصبی پایدار را فراهم نکنند [۳۳]. درمقابل، مطالعه حاضر با ترکیب تمرینات تعادلی، تقویتی و تحریک حسی هدفمند، در کنار پیگیری ۳ ماهه، شرایط مناسبی برای بهبود و تثبیت تغییرات فراهم آورد.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با طراحی دوگانه (حضوری و مجازی) و تمرکز ویژه بر بیماران مبتلا به نوروپاتی دیابتی، شواهد تازه‌ای در زمینه توان‌بخشی دیجیتال ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد آموزش

مجازی نه‌تنها جایگزین مناسبی برای روش حضوری است، بلکه در برخی شاخص‌های کلیدی، ازجمله حس لامسه و ارتعاش، حتی عملکرد بهتری دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت برنامه فال‌پروف، به‌ویژه در قالب دیجیتال، ابزاری نوین، ایمن و کارآمد برای بهبود عملکرد حسی و ارتقای کیفیت زندگی بیماران دیابتی محسوب می‌شود.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، پایداری اثرات تمرینات در بازه‌های زمانی طولانی‌تر بررسی شود. انجام تحلیل‌های فیزیولوژیکی برای شناسایی مکانیسم‌های بهبود حس نیز ضروری است. همچنین بررسی اثر این تمرینات بر سایر ابعاد عملکردی مانند تعادل، راه‌رفتن و کیفیت زندگی و مقایسه آن با سایر روش‌های تمرینی توصیه می‌شود. بررسی اثربخشی این مداخلات در جمعیت‌های پرخطر دیگر و نهایتاً مطالعه بر روی ارتباط بین بهبود عملکرد حسی با کاهش ترس از سقوط و بهبود تعادل، می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به اثرات درمانی فراهم کند.

ازجمله محدودیت‌های این مطالعه، امکان‌ناپذیری کورسازی کامل شرکت‌کنندگان نسبت به نوع مداخله بود؛ اگرچه مطالعه به‌صورت تک‌سوکور طراحی شد، اما شرکت‌کنندگان به‌دلیل ماهیت تمرینات، از نوع مداخله (حضوری یا مجازی) آگاه بودند که ممکن است بر نتایج ادراک‌شده تأثیر گذاشته باشد. همچنین در گروه مداخله مجازی، امکان پایش دقیق میزان وفاداری به تمرینات و مدت‌زمان واقعی اجرای آن‌ها وجود نداشت و بر گزارش‌های خوداظهاری شرکت‌کنندگان تکیه شد. این موضوع می‌تواند به سوگیری در برآورد میزان اثربخشی واقعی مداخله منجر شود، به‌ویژه آنکه مشاهده نتایج اولیه ممکن است انگیزه درونی شرکت‌کنندگان را برای پیگیری تمرینات افزایش داده باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مطالعه در کمیته اخلاق **دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی** با کد اخلاق (IR.USWR.REC.1403.136) تایید شده است و این مطالعه در **مرکز ثبت کارآزمایی بالینی ایران** با کد (IRCT20181117041673N2) ثبت شده است. در این مطالعه از تمامی شرکت کنندگاه رضایت کتبی اخذ شد و در آن به‌صورت کامل روند اجرای پژوهش توضیح داده شد.

حامی مالی

مطالعه حاضر بخشی از یافته حاصل از رساله دکتری سحر صادقی سده در گروه کاردرمانی **دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی** تهران است. **دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی** از این مقاله حمایت مالی کرده است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی: سحر صادقی سده و سعید فطوره‌چی؛ روش‌شناسی: بهمن صادقی سده و نازیلا اکبرفهیمی؛ اعتبارسنجی: سیدعلی حسینی؛ جمع‌آوری منابع، نگارش پیش‌نویس، ویرایش و نهایی‌سازی: بهمن صادقی سده و سحر صادقی سده؛ نظارت و مدیریت پروژه: سعید فطوره‌چی و عنایت بخشی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله از تمامی بیماران شرکت‌کننده در این مطالعه و نیز همکاران محترم در کلینیک دیابت بیمارستان صدیقه طاهره اصفهان که در مراحل غربالگری و اجرای مداخله همکاری ارزشمندی داشتند، صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین از تلاش‌های فنی و علمی تیم برنامه‌نویسی، به‌ویژه جناب آقای منصور پرتو در طراحی و توسعه نرم‌افزار توان‌بخشی «فال‌پروف»، سپاسگزاری می‌کنند.

References

[1] Sun H, Saeedi P, Karuranga S, Pinkepank M, Ogurtsova K, Duncan BB, et al. IDF diabetes atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045. Diabetes Research and Clinical Practice. 2022; 183:109119. [DOI:10.1016/j.diabres.2021.109119] [PMID]

[2] Khodakarami R, Abdi Z, Ahmadnezhad E, Sheidaei A, Asadi-Lari M. Prevalence, awareness, treatment and control of diabetes among Iranian population: results of four national cross-sectional STEPwise approach to surveillance surveys. BMC Public Health. 2022; 22(1):1216. [DOI:10.1186/s12889-022-13627-6] [PMID]

[3] Janjani P, Salehabadi Y, Motevaseli S, Heidari Moghadam R, Siabani S, Salehi N. Comparison of risk factors, prevalence, type of treatment, and mortality rate for myocardial infarction in diabetic and non-diabetic older adults: A cohort study. Salmand: Iranian Journal of Ageing. 2023; 18(2):268-83. [DOI:10.32598/sija.2022.3091.2]

[4] Rezaei M, FatorehChy S, Javaheri J. Investigation of dynamic balance and muscle strength of lower limbs in type 2 diabetic patients referred to Imam Reza Clinic (AS) in Arak City. Journal of Clinical Care and Skills. 2023; 4(4):175-82. [DOI:10.58209/jccs.4.4.175]

[5] Zhang P, Lu J, Jing Y, Tang S, Zhu D, Bi Y. Global epidemiology of diabetic foot ulceration: A systematic review and meta-analysis. Annals of Medicine. 2017; 49(2):106-16. [DOI:10.1080/07853890.2016.1231932] [PMID]

[6] Peters EJ, Armstrong DG, Lavery LA. Risk factors for recurrent diabetic foot ulcers: Site matters. Diabetes Care. 2007; 30(8):2077-9. [DOI:10.2337/dc07-0445] [PMID]

[7] Pound N, Chipchase S, Treece K, Game F, Jeffcoate W. Ulcer-free survival following management of foot ulcers in diabetes. Diabetic Medicine. 2005; 22(10):1306-9. [DOI:10.1111/j.1464-5491.2005.01640.x] [PMID]

[8] Van Netten J, Price PE, Lavery L, Monteiro-Soares M, Rasmussen A, Jubiz Y, et al. Prevention of foot ulcers in the at-risk patient with diabetes: A systematic review. Diabetes/Metabolism Research and Reviews. 2016; 32(Suppl 1):84-98. [DOI:10.1002/dmrr.2701] [PMID]

[9] Jeffcoate WJ, Vileikyte L, Boyko EJ, Armstrong DG, Boulton AJ. Current challenges and opportunities in the prevention and management of diabetic foot ulcers. Diabetes Care. 2018; 41(4):645-52. [DOI:10.2337/dc17-1836] [PMID]

[10] Suryani M, Samekto W, Susanto H, Dwiantoro L. Effect of foot-ankle flexibility and resistance exercise in the secondary prevention of plantar foot diabetic ulcer. Journal of Diabetes and its Complications. 2021; 35(9):107968. [DOI:10.1016/j.jdiacomp.2021.107968] [PMID]

[11] Sartor CD, Hasue RH, Cacciari LP, Butugan MK, Watari R, Pássaro AC, et al. Effects of strengthening, stretching and functional training on foot function in patients with diabetic neuropathy: Results of a randomized controlled trial. BMC Musculoskeletal Disorders. 2014; 15:1-13. [DOI:10.1186/1471-2474-15-137] [PMID]

[12] Chang CF, Chang CC, Hwang SL, Chen MY. Effects of buerger exercise combined health-promoting program on peripheral neurovasculopathy among community residents at high risk for diabetic foot ulceration. Worldviews on Evidence-Based Nursing. 2015; 12(3):145-53. [DOI:10.1111/wvn.12091] [PMID]

[13] Kanchanasamut W, Pensri P. Effects of weight-bearing exercise on a mini-trampoline on foot mobility, plantar pressure and sensation of diabetic neuropathic feet; A preliminary study. Diabetic Foot & Ankle. 2017; 8(1):1287239. [DOI:10.1080/2000625X.2017.1287239] [PMID]

[14] Cerrahoglu L, Koşan U, Sirin TC, Ulusoy A. Range of motion and plantar pressure evaluation for the effects of self-care foot exercises on diabetic patients with and without neuropathy. Journal of the American Podiatric Medical Association. 2016; 106(3):189-200. [DOI:10.7547/14-095] [PMID]

[15] Dijs HM, Roofthooft J, Driessens MF, De Bock P, Jacobs C, Van Acker KL. Effect of physical therapy on limited joint mobility in the diabetic foot. A pilot study. Journal of the American Podiatric Medical Association. 2000; 90(3):126-32. [DOI:10.7547/87507315-90-3-126] [PMID]

[16] Allet L, Armand S, De Bie R, Golay A, Monnin D, Aminian K, et al. The gait and balance of patients with diabetes can be improved: A randomised controlled trial. Diabetologia. 2010; 53(3):458-66. [DOI:10.1007/s00125-009-1592-4] [PMID]

[17] Francia P, Anichini R, De Bellis A, Seghieri G, Lazzeri R, Paternostro F, et al. Diabetic foot prevention: The role of exercise therapy in the treatment of limited joint mobility, muscle weakness and reduced gait speed. Italian Journal of Anatomy and Embryology = Archivio Italiano di Anatomia ed Embriologia. 2015; 120(1):21-32. [PMID]

[18] Rose DJ. Reducing the risk of falls among older adults: The fallproof balance and mobility program. Current Sports Medicine Reports. 2011; 10(3):151-6. [DOI:10.1249/JSR.0b013e31821b1984] [PMID]

[19] Sheikhshoaei H, Bahiraei S, Safavi M. [Investigating the impact of fall-proof exercises on the balance system of elderly women with knee osteoarthritis(Persian)]. Salmand: Iranian Journal of Ageing. 2025; 19(4):558-71. [DOI:10.32598/sija.2023.3721.1]

[20] Fathi S, Sadeghi Sede B, Safaein A, Fatorehchy S, Akbarfahimi N, Sadeghi Sede S. [Investigating the effect of fall- proof exercises on balance and fall prevention in the elderly: A systematic review and meta-analysis (Persian)]. Salmand: Iranian Journal of Ageing 2026; 21(1):1. [Link]

[21] Khazanin H, Daneshmandi H, Fakoor Rashid H. Effect of selected fall-proof exercises on fear of falling and quality of life in the elderly. Iranian Journal of Ageing. 2022; 16(4):564-77. [DOI:10.32598/sija.2021.3152.1]

[22] Sharahi MY, Raeisi Z. Effects of otago and fit-and-fall proof home-based exercises on older adults' balance, quality of life, and fear of falling: A randomized, single-blind clinical trial. Sport Sciences for Health. 2025; 21:1177–86. [DOI:10.1007/s11332-025-01357-2]

[23] Rose DJ. Fallproof!: A comprehensive balance and mobility training program. Champaign: Human Kinetics; 2010. [Link]

[24] Sun J, Wang Y, Zhang X, Zhu S, He H. Prevalence of peripheral neuropathy in patients with diabetes: A systematic review and meta-analysis. Primary Care Diabetes. 2020; 14(5):435-44. [DOI:10.1016/j.pcd.2019.12.005] [PMID]

[25] Pocock SJ, Simon R. Sequential treatment assignment with balancing for prognostic factors in the controlled clinical trial. Biometrics. 1975; 31(1):103-15. [DOI:10.2307/2529712] [PMID]

[26] Nanayakkara N, Ranasinha S, Gadowski A, Heritier S, Flack JR, Wischer N, et al. Age, age at diagnosis and diabetes duration are all associated with vascular complications in type 2 diabetes. Journal of Diabetes and its Complications. 2018; 32(3):279-90. [DOI:10.1016/j.jdiacomp.2017.11.009] [PMID]

[27] Moghtaderi A, Bakhshipour A, Rashidi H. Validation of Michigan neuropathy screening instrument for diabetic peripheral neuropathy. Clinical Neurology and Neurosurgery. 2006; 108(5):477-81. [DOI:10.1016/j.clineuro.2005.08.003] [PMID]

[28] Sadeghi S, Nourozi A, Azadi H, Faraji F, Mardani M, Sadeghi B. Comparing vitamin b12 and nitrous oxide neurotoxicity in operating room staff and other hospital staff: A multicenter study. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2019; 29(173):134-9. [Link]

[29] Boulton AJ, Armstrong DG, Albert SF, Frykberg RG, Hellman R, Kirkman MS, et al. Comprehensive foot examination and risk assessment: a report of the task force of the foot care interest group of the American Diabetes Association, with endorsement by the American Association of Clinical Endocrinologists. Diabetes Care. 2008; 31(8):1679-85. [DOI:10.2337/dc08-9021] [PMID]

[30] Frykberg RG, Lavery LA, Pham H, Harvey C, Harkless L, Veves A. Role of neuropathy and high foot pressures in diabetic foot ulceration. Diabetes Care. 1998; 21(10):1714-9. [DOI:10.2337/diacare.21.10.1714] [PMID]

[31] Perkins BA, Olaleye D, Zinman B, Bril V. Simple screening tests for peripheral neuropathy in the diabetes clinic. Diabetes Care. 2001; 24(2):250-6. [DOI:10.2337/diacare.24.2.250] [PMID]

[32] Berg KO, Wood-Dauphinee SL, Williams JI, Maki B. Measuring balance in the elderly: Validation of an instrument. Canadian Journal of Public Health. 1992; 83(Suppl 2):S7-11. [PMID]

[33] Nogueira LRN, Nogueira CM, da Silva AE, Luvizutto GJ, de Sousa LAPS. Balance evaluation in individuals with type 2 diabetes mellitus with and without peripheral neuropathy. Journal of Bodywork and Movement Therapies. 2024; 40:534-9. [DOI:10.1016/j.jbmt.2024.05.010] [PMID]

[34] Khurshid S, Saeed A, Kashif M, Nasreen A, Riaz H. Effects of multisystem exercises on balance, postural stability, mobility, walking speed, and pain in patients with diabetic peripheral neuropathy: A randomized controlled trial. BMC Neuroscience. 2025; 26(1):16. [DOI:10.1186/s12868-024-00924-6] [PMID]

[35] Feng S, Tang M, Huang G, Wang J, He S, Liu D, et al. EMG biofeedback combined with rehabilitation training may be the best physical therapy for improving upper limb motor function and relieving pain in patients with the post-stroke shoulder-hand syndrome: A Bayesian network meta-analysis. Frontiers in Neurology. 2023; 13:1056156. [DOI:10.3389/fneur.2022.1056156] [PMID]

[36] Kosarian Z, Zakerkish M, Mehravar M, Shaterzadeh Yazdi M, Hesam S. Motor strategies used to restore balance in people with and without impaired sensory organization suffering from diabetic polyneuropathy. Jundishapur Scientific Medical Journal. 2022; 21(4):560-73. [DOI:10.32598/JSMJ.21.4.2844]

[37] Boob M, Phansopkar P. Effect of foot core exercises vs ankle proprioceptive neuromuscular facilitation on pain, range of motion, and dynamic balance in individuals with plantar fasciitis: A comparative study. F1000Research. 2024; 12:765. [DOI:10.12688/f1000research.136828.1]

[38] Atre JJ, Ganvir SS. Effect of functional strength training versus proprioceptive neuromuscular facilitation on balance and gait in patients with diabetic neuropathy. Indian Journal of Physical Therapy and Research. 2020; 2(1):47-54. [DOI:10.4103/ijptr.ijptr_76_19]

[39] Look AHEAD Research Group. Effects of a long-term lifestyle modification programme on peripheral neuropathy in overweight or obese adults with type 2 diabetes: The Look AHEAD study. Diabetologia. 2017; 60(6):980-8. [DOI:10.1007/s00125-017-4253-z] [PMID]

[40] Callaghan BC, Little AA, Feldman EL, Hughes RA. Enhanced glucose control for preventing and treating diabetic neuropathy. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2012(6):1. [DOI:10.1002/14651858.CD007543.pub2]

[41] Morgenstern J, Groener JB, Jende JME, Kurz FT, Strom A, Göpfert J, et al. Neuron-specific biomarkers predict hypo- and hyperalgesia in individuals with diabetic peripheral neuropathy. Diabetologia. 2021; 64(12):2843-55. [DOI:10.1007/s00125-021-05557-6] [PMID]