International Journal of Education, Management, and Technology

e-ISSN : 3026-5444
p-ISSN : 3026-4200

Index: Harvard, Boston, Sydney University, Copernicus, Scilit, Semantic, Dimensions, etc

https://doi.org/10.58578/IJEMT.v4i2.11741

النشاط البدني ودوره في حماية الوظائف التنفيذية من التدهور المرتبط بالعمر: مقاربة نظرية تحليلية

Physical Activity and Its Role in Protecting Executive Functions from Age-Related Decline: A Theoretical and Analytical Approach

Zhor Bejja & Atikka Bounou
Ibn Tofail University, Morocco
zhor.bejja@uit.ac.ma; atikka.bounou@uit.ac.ma

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Jul 17, 2026	Aug 14, 2026	Aug 26, 2026	Aug 31, 2026

Abstract

Age-related cognitive decline represents one of the most significant health challenges in contemporary societies, with executive functions (EF) being among the most affected cognitive domains. This theoretical article aims to provide an integrative analytical framework for understanding the role of physical activity as a protective factor against age-related executive decline. The proposed approach rests on four pillars: first, reviewing epidemiological and experimental evidence from longitudinal studies, meta-analyses, and network meta-analyses that confirm the protective efficacy of physical activity; second, analyzing the neurobiological and physiological mechanisms underlying this protection, including structural and functional brain network changes as revealed by functional neuroimaging studies; third, discussing the quantitative dose-response relationship between exercise dose and protective response in light of Bayesian dose-response models; and fourth, comparing the relative effectiveness of different exercise modalities (aerobic, resistance, multicomponent, mind-

IJEMT Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

body, and high-intensity interval training) in improving subcomponents of executive functions. Accumulated evidence indicates that regular physical activity enhances executive functions through multiple mechanisms including improved cerebral perfusion, increased release of neurotrophic factors, enhanced synaptic plasticity, and functional reorganization of brain networks associated with executive control, with distinct effect patterns emerging depending on exercise type, targeted executive subcomponent, age group, and clinical status. Studies also show that protective effects follow a nonlinear relationship with exercise dose, with optimal doses ranging between 670 and 1200 MET-min/week. The article concludes that physical activity constitutes a promising non-pharmacological strategy for preventing age-related executive decline, emphasizing the need to transition toward evidence-based personalized exercise prescriptions that account for individual differences in age, health status, and targeted executive components.

Keywords: Physical Activity; Executive Functions; Age-Related Cognitive Decline; Neurocognitive Aging; Neuroplasticity

ملخص :يمثل التدهور المعرفي المرتبط بالعمر أحد أبرز التحديات الصحية في المجتمعات المعاصرة، وتشكل الوظائف التنفيذية (Executive Functions) من بين المجالات المعرفية الأكثر تأثراً بهذه العملية. يهدف هذا المقال النظري إلى تقديم إطار تحليلي متكامل لفهم دور النشاط البدني بصفته عاملاً وقائياً يحمي الوظائف التنفيذية من التدهور المرتبط بالعمر. تستند المقاربة المطروحة إلى أربع ركائز أساسية: أولاً، استعراض الأدلة الوبائية والتجريبية المستمدة من الدراسات الطولية والتحليلات التلوية وشبكات التحليل التلوي التي تؤكد الفعالية الوقائية للنشاط البدني؛ ثانياً، تحليل الآليات العصبية الحيوية والفسيولوجية الكامنة وراء هذه الحماية، بما في ذلك التغيرات الهيكلية والوظيفية في شبكات الدماغ كما تكشفها دراسات التصوير العصبي الوظيفي؛ ثالثاً، مناقشة العلاقة الكمية بين جرعة التمرين والاستجابة الوقائية في ضوء نماذج الجرعة-الاستجابة البايزية؛ ورابعاً، مقارنة الفعالية النسبية لأنماط التمرين المختلفة (الهوائية، المقاومة، متعددة المكونات، تمارين العقل-الجسد، والتدريب المتقطع عالي الكثافة) في تحسين مكونات الوظائف التنفيذية الفرعية. تشير الأدلة المتراكمة إلى أن النشاط البدني المنتظم يعزز الوظائف التنفيذية من خلال آليات متعددة تشمل تحسين التروية الدماغية، وزيادة إفراز العوامل العصبية التغذوية، وتعزيز اللدونة العصبية، وإعادة تنظيم الاتصال الوظيفي في شبكات الدماغ المرتبطة بالتحكم التنفيذي، مع ظهور أنماط تأثيرية مختلفة باختلاف نوع التمرين والمكون التنفيذي المستهدف والفئة العمرية والحالة السريرية. كما تظهر الدراسات أن التأثيرات الوقائية تخضع لعلاقة غير خطية مع جرعة التمرين، حيث تتراوح الجرعة المثلى بين 670 و1200 MET-دقيقة/أسبوعياً. يخلص المقال إلى أن النشاط البدني يشكل استراتيجية غير دوائية واعدة للوقاية من التدهور التنفيذي المرتبط بالعمر، مع التأكيد على ضرورة الانتقال نحو توصيات حركية مخصصة قائمة على الأدلة تراعي الفروق الفردية في العمر والحالة الصحية والمكون التنفيذي المستهدف.

الكلمات المفتاحية :النشاط البدني؛ الوظائف التنفيذية؛ التدهور المعرفي المرتبط بالعمر؛ الشيخوخة العصبية؛ اللدونة العصبية

مقدمة

يشكل التدهور المعرفي المرتبط بالعمر واحداً من أبرز التحديات الصحية والاجتماعية في عصرنا الراهن، في ظل تزايد نسبة كبار السن في التركيبة السكانية العالمية. تشير التقديرات إلى أن أكثر من 50 مليون شخص يعانون من الخرف على المستوى العالمي، مع توقعات بارتفاع هذا العدد إلى 152 مليوناً بحلول عام 2050 (Livingston et al., 2020). وفي هذا السياق، تبرز الوظائف التنفيذية (Executive Functions) بوصفها من بين المجالات المعرفية الأكثر عرضة للتدهور مع تقدم العمر، إذ تظهر مؤشرات الانحدار في هذه الوظائف بدءاً من مرحلة البلوغ المتوسط (Ye et al., 2024).

تُعرف الوظائف التنفيذية بأنها مجموعة العمليات المعرفية العليا التي تمكن الفرد من تنظيم أفكاره وأفعاله أثناء السلوكيات الموجهة نحو الهدف (Diamond, 2013). وتتألف من ثلاث وظائف فرعية جوهرية :التحكم التثبيطي (Inhibitory Control) أي مقاومة السلوكيات السائدة أو التلقائية أو المندفعة؛ المرونة المعرفية (Cognitive Flexibility) أي القدرة على التبديل بين المهام أو العمليات الذهنية؛ و الذاكرة العاملة (Working Memory) أي تخزين المعلومات ومعالجتها في الدماغ (Diamond, 2013; Miyake et al., 2000)وتوضح الأدبيات أن هذه الوظائف ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالأداء الأكاديمي، والصحة النفسية والجسدية، إذ قد تؤدي أوجه القصور فيها إلى اضطرابات نفسية في مرحلة المراهقة وأمراض تنكسية كالزهايمر في الشيخوخة.

في مواجهة هذا التحدي، برز النشاط البدني خلال العقدين الماضيين بصفته تدخلاً غير دوائي واعداً للحفاظ على الصحة المعرفية والوقاية من تدهورها. وقد اكتسب النشاط البدني المنتظم الاعتراف بصفته عاملاً وقائياً للوظائف المعرفية (W. Zhang et al., 2026) . وتشير الأدلة المتراكمة إلى أن ممارسة النشاط البدني بانتظام لا تقتصر فوائدها على الصحة الجسدية، بل تمتد لتشمل تعزيز الوظائف المعرفية العليا، وعلى رأسها الوظائف التنفيذية، مع ظهور تأثيرات وقائية أكثر وضوحاً لدى الفئات العمرية المتقدمة. غير أن الآليات العصبية والنفسية العصبية الكامنة وراء هذه التأثيرات

الوقائية، فضلاً عن محددات الجرعة المثلى للتمرين ونمطه، لا تزال محوراً للبحث والنقاش (S. Tian et al., 2023; M. Zhang et al., 2023).

يهدف هذا المقال النظري إلى تقديم مقاربة تحليلية متكاملة لدور النشاط البدني في حماية الوظائف التنفيذية من التدهور المرتبط بالعمر، من خلال استعراض الأدلة الوبائية والتجريبية، وتحليل الآليات العصبية الحيوية كما تكشفها دراسات التصوير العصبي الوظيفي، ومناقشة محددات الجرعة الوقائية في ضوء نماذج الجرعة-الاستجابة الحديثة، مع مقارنة الفعالية النسبية لأنماط التمرين المختلفة، وطرح توجهات بحثية مستقبلية.

التدهور المرتبط بالعمر في الوظائف التنفيذية: الطبيعة والأبعاد

الأنماط الزمنية للتدهور التنفيذي

يرتبط التقدم في العمر بتغيرات هيكلية ووظيفية في الدماغ، تتجلى في تراجع حجم المادة الرمادية والبيضاء، وانخفاض كفاءة الاتصال بين المناطق الدماغية، واضطراب في أنظمة الناقلات العصبية. وتعد المناطق الجبهية - وهي الركيزة العصبية الأساسية للوظائف التنفيذية - من بين أكثر المناطق تضرراً بهذه التغيرات المرتبطة بالعمر. وتشير الدراسات إلى أن هذه الأخيرة تشمل انخفاض تكون الخلايا العصبية، وضعف اللدونة العصبية، وانخفاض التروية الدماغية (Fjell & Walhovd, 2010) وتسهم هذه التغيرات بشكل جماعي في التدهور المعرفي، لا سيما في الذاكرة والوظائف التنفيذية وسرعة المعالجة (Fjell & Walhovd, 2010; Park & Reuter-Lorenz, 2009).

وتتباين وتيرة التدهور بين مكونات الوظائف التنفيذية المختلفة؛ فبعض المكونات كالتحكم التثبيطي والمرونة المعرفية تظهر تراجعاً أسرع مقارنة بمكونات أخرى، في حين أن الذاكرة العاملة قد تشهد أنماطاً مختلفة من التغير. وقد أشار Ye وآخرون (2024) إلى أن تدهور الوظيفة التنفيذية يعد سمة مميزة للشيخوخة المعرفية، حيث تبدأ علامات الانحدار في الظهور باكراً في منتصف العمر. وتتفق هذه النتائج مع ما خلصت إليه دراسة Tian وآخرين (2023) من أن النشاط البدني يحسّن الوظائف التنفيذية لدى الأفراد المستقرين حركياً، وإن كان التأثير يتفاوت حسب المجال المعرفي ويتأثر بعوامل وصفة التمرين والعمر.

العو اقب الوظيفية والسريرية

يمتد تأثير تدهور الوظائف التنفيذية إلى ما وراء المقاييس المعرفية المخبرية، ليطال الأداء الوظيفي في الحياة اليومية. فالوظائف التنفيذية ضرورية للتخطيط، واتخاذ القرارات، وحل المشكلات، والتحكم في الانفعالات، والتكيف مع المواقف الجديدة. ويؤدي تراجعها إلى زيادة الاعتماد على الآخرين، وتراجع جودة الحياة، وارتفاع مخاطر الحوادث والإصابات. ومن منظور سريري، يُعتبر تدهور الوظائف التنفيذية مؤشراً إنذارياً مبكراً للإصابة بمرض الزهايمر وغيره من أمراض التنكس العصبي، مما يجعل استهدافها بالتدخلات الوقائية أولوية صحية كبرى.

ويزداد هذا التحدي خطورة في سياق الضعف الإدراكي الخفيف(MCI) ، الذي يُعد مرحلة وسيطة بين الشيخوخة الطبيعية والخرف وعامل خطر حاسماً للتقدم نحو مرض الزهايمر (Petersen, 2004). وتتراوح تقديرات انتشار MCI بين 6.7% و25.2% بين كبار السن (Petersen, 2011)، مع معدلات تحول إلى مرض الزهايمر تصل إلى 28% (Petersen, 2004).

الأدلة على التأثيرات الوقائية للنشاط البدني

الأدلة المستمدة من الدراسات الوبائية الطولية

تقدم الدراسات الوبائية الطولية أدلة قوية على العلاقة بين النشاط البدني وانخفاض خطر التدهور المعرفي. فقد أظهرت دراسة طولية حديثة (2025) أن الخرف وانخفاض الأداء المعرفي ارتبطا بانخفاض حجم وكثافة النشاط البدني اليومي، فضلاً عن أنماط نشاط بدني أكثر تجزؤاً وأقل اتساقاً (Davoudi et al., 2025). وتشير هذه النتائج إلى وجود تأثير عكسي محتمل للتغير المعرفي السلبي على النشاط البدني، مما يخلق حلقة مفرغة من التدهور المتبادل.

وفي سياق متصل، كشفت دراسة Marent وآخرين (2025) التي شملت 233 بالغاً أصحاء تبلغ أعمارهم 55 عاماً فما فوق، أن توزيع وقت الحركة اليومي (النشاط البدني، السلوك الخامل، النوم) ارتبط بشكل ملحوظ بالذاكرة قصيرة المدى($p = 0.01$) والوظيفة التنفيذية ($p = 0.001$). وأظهرت نماذج الاستبدال الزمني التركيبي أن إعادة تخصيص 30 دقيقة من النشاط البدني الخفيف إلى النشاط البدني المعتدل-الشديد ارتبطت بأكبر الفروق المعنوية في الذاكرة قصيرة المدى (0.19) والوظيفة التنفيذية (0.21) (Marent et al., 2025). والأهم من ذلك، أن إعادة تخصيص حتى 5

دقائق من النشاط البدني المعتدل-الشديد إلى أي سلوك آخر ارتبطت بانخفاض معنوي في درجات الذاكرة قصيرة المدى والوظيفة التنفيذية(Marent et al., 2025). وتؤكد هذه النتائج أهمية تخصيص وقت للنشاط البدني المعتدل-الشديد للحفاظ على المجالات المعرفية المحددة.

الأدلة المستمدة من التحليلات التلوية وشبكات التحليل التلوي

قدّمت التحليلات التلوية للتجارب المعشاة ذات الشواهد (Randomized Controlled Trials - RCTs Meta-analysis) وشبكات التحليل التلوي (Network Meta-Analysis - NMA) أدلة أكثر قوة على الصلة السببية بين النشاط البدني والوظائف التنفيذية، مع تمييز دقيق بين فعالية أنماط التمرين المختلفة.

التحليلات التلوية للتمارين الهوائية :أجرى Ye وآخرون (2024) مراجعة منهجية وتحليلا تلويا شمل 42 تجربة معشاة بـ 2881 مشاركا من البالغين في منتصف العمر وكبار السن، وتبين أن التمارين الهوائية تحسن بشكل ملحوظ المرونة المعرفية (Hedge's g = 0.343)، والذاكرة العاملة (Hedge's g = 0.392)، والتحكم التثبيطي (Hedge's g = 0.229). غير أن التمارين الهوائية لم تظهر تحسنا في التخطيط (Hedge's g = 0.094)، مما يشير إلى خصوصية تأثيرية تتطلب مزيدا من الدراسة. وخلص الباحثون إلى أن برامج التمرين الهوائي المخصصة قد تكون أكثر فعالية لتعزيز الوظيفة التنفيذية لدى البالغين الأصحاء في منتصف العمر وكبار السن (Ye et al., 2024).

شبكات التحليل التلوي للمقارنة بين الأنماط :أجرى Han وآخرون (2025) شبكة تحليل تلوي شملت 58 تجربة معشاة بـ 4349 بالغاً أصحاء تبلغ أعمارهم 60 عاما فما فوق، لمقارنة خمسة أنماط من التمارين: التدريب المقاوم، التمارين الهوائية، تمارين العقل-الجسد، التمارين متعددة المكونات، والتدريب المتقطع عالي الكثافة (High-Intensity Interval Training - HIIT). وأظهرت النتائج أن التدريب المقاوم كان الأكثر فاعلية في تحسين الوظيفة الإدراكية العامة (SMD = 0.55)، وكذلك في تحسين التحكم التثبيطي (SMD = 0.31؛ SUCRA = 82.1%). خاصة مع جلستين أسبوعيا مدة كل منهما 45 دقيقة على مدى 12 أسبوعا (Han et al., 2025). في المقابل، كانت تمارين العقل-الجسد الأكثر فعالية للوظيفة التنفيذية، خاصة قدرة تبديل المهام (SMD = -0.58 ؛ SUCRA = 85.1%) والذاكرة العاملة (SMD= 2.45) ، مع تحقيق البروتوكولات عالية التردد

ومتوسطة المدة للنتائج المثلى (Han et al., 2025). وكانت التمارين الهوائية الأكثر فعالية لتعزيز وظيفة الذاكرة (SMD = 0.42). ولوحظت أكبر الفوائد المعرفية لدى المشاركين الذين تتراوح أعمارهم بين 65 و75 عاماً وفي الدراسات التي أجريت في آسيا(Han et al., 2025). وتشير هذه النتائج إلى أن أنماط التمرين المختلفة توفر فوائد معرفية خاصة بالمجال، مما يدعم التوصيات بالوصفات التمرينية المخصصة.

التمارين متعددة المكونات: أظهرت مراجعة شاملة أن التمارين متعددة المكونات (Multi-Component Exercises – MCE) تمثل استراتيجية واعدة لتعزيز الوظيفة المعرفية لدى كبار السن، مع فعالية مثبتة في تحسين الوظيفة الإدراكية العامة والوظيفة التنفيذية (Giné-Garriga et al., 2014).

التمارين المقاومة لدى المصابين بالخرف: في سياق مختلف، أجرى Zhu وآخرون (2025) شبكة تحليل تلوي شملت 24 دراسة لتقييم تأثيرات تدخلات النشاط البدني المختلفة على الوظيفة التنفيذية لدى كبار السن المصابين بالخرف. وأظهرت النتائج أن التمرين المقاوم كان الأكثر فعالية في تحسين الوظيفة التنفيذية، إذ احتل المرتبة الأولى وفق مؤشر SUCRA (89.2%)، مع أعلى احتمال لاحتلال المرتبة الأولى (PrBest = 59.9%)، يليه تمارين العقل–الجسد (SUCRA = 71.4%، PrBest = 18.9%)، ثم التمارين الهوائية (SUCRA = 60.0% ، PrBest = 4.2%) (Zhu et al., 2025). وتشير هذه النتائج إلى أن كلا من التمرين المقاوم وتمارين العقل-الجسد أكثر فعالية في تعزيز الوظيفة التنفيذية لدى كبار السن المصابين بالخرف، مما يعكس تمايزاً في الاستجابة حسب الحالة السريرية.

المشي الشمالي: (Nordic Walking) أظهر تحليل تلوي آخر (2025) أن المشي الشمالي، كشكل متخصص من التمارين الهوائية، حسن الوظيفة التنفيذية لدى كبار السن حيث بلغ حجم الأثر Hedges' g = 0.89، مع فاصل ثقة 95% يتراوح بين 0.27 و1.50، وكانت الفروق ذات دلالة إحصائية (p = 0.01) خاصة لدى كبار السن الذين يعانون من حالات صحية (H. Li et al., 2025). وكشف تحليل الانحدار التلوي عن ارتباط إيجابي معنوي بين إجمالي وقت التدخل وحجم الأثر (p < 0.01) (H. Li et al., 2025).

التمرين لدى مرضى الزهايمر : أظهرت مراجعة منهجية وتحليل تلوي (2025) شملت 16 تجربة معشاة أن التدخلات القائمة على التمرين ارتبطت بتحسينات صغيرة إلى متوسطة في الطلاقة اللفظية (SMD = 0.17)، والذاكرة العاملة المكانية (SMD = 0.61)، والوظائف التنفيذية (SMD = 0.53)لدى كبار السن المصابين بمرض الزهايمر(Liu & Casasola, 2025). وأشارت تحليلات الفئات الفرعية إلى مكاسب معرفية أكبر لدى المشاركين الذين تبلغ أعمارهم 75 عاماً فما فوق (Liu & Casasola, 2025).

الأدلة على التمايز العمري في الاستجابة

تظهر الأدلة باستمرار أن التأثيرات الوقائية للنشاط البدني على الوظائف التنفيذية تكون أكثر وضوحا لدى الفئات العمرية المتقدمة. فقد أشارت دراسة Tian وآخرين (2023) إلى أن النشاط البدني حسن الوظائف التنفيذية لدى كبار السن (≤ 60 عاماً) بحجم أثر معياري (SMD = 0.25)، بينما لم يحقق تأثيرا ذا دلالة إحصائية لدى الأصغر سنا(SMD = 0.17) . ويعزى هذا التباين إلى أن كبار السن يمتلكون مجالا أوسع للتحسن نظرا لوجود تدهور معرفي مسبق، مما يجعل النشاط البدني تدخلا وقائيا وعلاجيا أكثر فعالية في هذه الفئة.

وتتفق هذه النتائج مع ما خلصت إليه مراجعة شاملة أجراها Zhang وآخرون (2023) من أن أكبر التأثيرات الإيجابية للتمرين على الوظائف المعرفية سجلت لدى البالغين فوق 60 عاما. كما أظهرت دراسة Han وآخرين (2025) أن أكبر الفوائد المعرفية لوحظت لدى المشاركين الذين تتراوح أعمارهم بين 65 و75 عاما.

الآليات العصبية والفسيولوجية للحماية

الآليات الجزيئية والخلوية

تستند التأثيرات الوقائية للنشاط البدني على الوظائف التنفيذية إلى سلسلة مترابطة من الآليات العصبية الحيوية. فعلى المستوى الجزيئي، يحفز التمرين البدني إفراز العامل العصبي التغذوي المستمد من الدماغ(Brain-Derived Neurotrophic Factor – BDNF) ، الذي يلعب دورا محوريا في تعزيز اللدونة المشبكية، وتكوين الخلايا العصبية الجديدة (neurogenesis)، وبقاء الخلايا العصبية.

كما يزيد التمرين من إفراز عوامل النمو الأخرى كعامل النمو الشبيه بالأنسولين-1(IGF-1) ، الذي يسهم في حماية الخلايا العصبية وتعزيز وظائفها (Gomez-Pinilla, 2008)، وتعمل هذه العوامل معا على تحسين كفاءة الاتصال بين الخلايا العصبية في المناطق الدماغية المرتبطة بالوظائف التنفيذية، وخاصة القشرة الجبهية والمنطقة تحت الحصين.

وعلى المستوى الفسيولوجي، يحسن النشاط البدني التروية الدماغية، ويزيد من توصيل الأكسجين والمواد المغذية إلى أنسجة الدماغ، ويعزز المرونة الوعائية. وتسهم هذه التغيرات في الحفاظ على سلامة الأوعية الدموية الدماغية، والحد من تراكم اللويحات الأميلويدية والبروتينات السامة المرتبطة بأمراض التنكس العصبي. كما يقلل التمرين من الالتهاب العصبي والإجهاد التأكسدي، وهما عاملان رئيسيان في التدهور المعرفي المرتبط بالعمر (Gomez-Pinilla, 2008).

التغيرات الهيكلية

كشفت دراسات التصوير العصبي الهيكلي عن أن تمارين العقل-الجسد ترتبط بتحسين حجم المادة الرمادية في مناطق دماغية حساسة للتنكس العصبي، بما في ذلك الحصين، والتلفيف الحزامي الأمامي الثنائي، والمناطق الجبهية-الصدغية-القذالية (H. Tian et al., 2025). كما أظهرت هذه الدراسات تغيرات في الاتصال الوظيفي للشبكة الافتراضية (Default Mode Network - DMN) والشبكة الانتباهية الظهرانية (Dorsal Attention Network - DAN)، والنشاط العصبي في المناطق الدماغية الرئيسية لدى كبار السن المصابين بضعف إدراكي خفيف (H. Tian et al., 2025).

إعادة التنظيم الوظيفي للشبكات الدماغية

كشفت دراسات التصوير العصبي الوظيفي عن أن النشاط البدني يعيد تنظيم أنماط الاتصال الوظيفي في شبكات الدماغ المرتبطة بالتحكم التنفيذي. فقد أجرى فريق بحثي (2025) تحليلاً تلويًا بطريقة تقدير الاحتمالية التنشيطية (Activation Likelihood Estimation – ALE) ضم 20 دراسة تصوير عصبي وظيفي (Functional Magnetic Resonance Imaging - fMRI) أثناء أداء المهام وفي حالة الراحة، لاستقصاء الآليات الدماغية الكامنة وراء تأثيرات التمرين على الوظائف التنفيذية لدى الفئات السليمة. أظهرت النتائج أن تدخلات التمرين غيرت بشكل ملحوظ أنماط التنشيط الدماغي أثناء المهام المعرفية، خاصة في مناطق الفص الجبهي (frontal lobe)، والوتدي (precuneus)، والمهاد (thalamus)، والتلفيف الحزامي (cingulate gyrus) (G. Li et al., 2025).

وفي تحليل تلوي أكثر تفصيلا، أجرى فريق بحثي آخر (2025) تحليلاً تلويًا بطريقة ALE شمل 34 دراسة تصوير عصبي وظيفي، مصنفة حسب نوع المهمة المعرفية. وأظهرت النتائج أن التمرين البدني يعزز التنشيط في مناطق "المركز العام (domain-general hubs) " مثل الوتدي(precuneus) ، مع تأثيرات خاصة بالمهمة في مناطق مرتبطة بالتحكم الحركي والتنفيذي(G. Li et al., 2025). وقد اقترح الباحثون نموذج **"إعادة التخصيص الوظيفي الناتج عن التمرين** (Physical Exercise-Driven Functional Reallocation Model)"، الذي يفترض أن التمرين يعزز التنشيط في المناطق الأساسية (core enhancement) مع كبح المناطق المساعدة (auxiliary suppression)، مما يعكس إعادة توزيع للموارد العصبية تتجاوز نماذج الكفاءة/التعزيز الكلاسيكية (G. Li et al., 2025).

وفي سياق أكثر تحديدا، أظهرت دراسة Song وآخرين (2025) باستخدام التصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي (fMRI) أن كبار السن النشطين بدنيا يحتاجون إلى تنشيط دماغي أقل لأداء مهام الوظائف التنفيذية مقارنة بأقرانهم الخاملين، مما يشير إلى كفاءة عصبية معززة. وقد خلص الباحثون إلى أن كبار السن النشطين يتطلبون تنشيطا دماغيا أقل لأداء مهام الوظيفة التنفيذية، مما يشير إلى كفاءة معرفية محسّنة، في حين أظهر الشباب أنماطاً مختلفة من التنشيط الدماغي تشير إلى آليات تعويضية محتملة (Song et al., 2025).

التأثيرات العصبية الكهربائية

كشفت دراسات تخطيط الدماغ الكهربائي (Event-Related Potentials - ERP) عن آليات عصبية دقيقة للتأثيرات الوقائية للنشاط البدني. فقد أظهرت دراسة Sanchez-Lopez وآخرين (2025) أن النشاط البدني العرضي - (incidental physical activity) الحركات اليومية غير المخطط لها كالمشي أو الأعمال المنزلية - ارتبط بمعالجة مثبطة أكثر فعالية في المراحل المتأخرة (1,050-1,200 مللي ثانية) أثناء مهمة Stroop العددي، مما يشير إلى معالجة أكثر فعالية للمراحل المتأخرة من التثبيط بعد التنفيذ، المرتبطة على الأرجح بإعادة التقييم وحل النزاع (Sanchez-Lopez et al., 2025). كما أظهرت المجموعة عالية النشاط البدني العرضي فروقا بين الحالات المتطابقة وغير المتطابقة بين 300 و500 مللي ثانية، مما يشير إلى مراقبة نزاع أبكر، في حين أظهرت المجموعة منخفضة النشاط فروقا معنوية على مناطق جبهية في نافذة 500-700 مللي ثانية، مما يشير إلى استراتيجية مختلفة لحل التداخل (Sanchez-Lopez et al., 2025). وتشير هذه النتائج إلى أن النشاط البدني العرضي قد

يعزز الوظيفة التنفيذية من خلال دعم المراحل المتأخرة من آليات التحكم التثبيطي على المستوى العصبي، حتى عندما يظل الأداء السلوكي مماثلا (Sanchez-Lopez et al., 2025).

محددات الجرعة الوقائية: نحو توصيات مخصصة

العلاقة غير الخطية بين الجرعة والاستجابة

تمثل علاقة الجرعة-الاستجابة (dose-response relationship) أحد المحاور الأساسية في فهم التأثيرات الوقائية للنشاط البدني. وقد كشفت التحليلات التلوية الحديثة عن أن تأثير التمرين على الوظائف التنفيذية يخضع لعلاقة غير خطية، حيث تتباين الاستجابة باختلاف جرعة التمرين.

في سياق مرض الزهايمر، أجرى فريق بحثي (2025) تحليلا بايزي للجرعة-الاستجابة باستخدام إطار بايزي لنمذجة منحنيات الجرعة-الاستجابة المستمرة وتقييم التأثيرات النسبية للتدريب الهوائي والتدريب البدني المتكامل والتمرين المقاوم ضمن هيكل شبكي. وأظهرت النتائج أن تدخلات التمرين أظهرت علاقة غير خطية مع الوظيفة التنفيذية، مع تسجيل أقوى تأثير عند حوالي 1000-MET دقيقة/أسبوعيا (Sui & Wang, 2025). وتراوحت الجرعة المثلى بين 670 و1200-MET دقيقة/أسبوعياً، وهو نطاق يتوافق مع توصيات منظمة الصحة العالمية لكبار السن (Sui & Wang, 2025).

وأظهرت الدراسة أن التدريب الهوائي المستمر كان فعالا عند حمولات معتدلة (670 -MET دقيقة/أسبوعيا)، مما يشير إلى عتبة جرعة منخفضة نسبيا للفائدة. في المقابل، تطلب التدريب البدني المتكامل جرعات أعلى (حوالي 1200-MET دقيقة/أسبوعياً) للوصول إلى ذروة التأثير، مما يشير إلى اعتماد أكبر على الشدة. أما التمرين المقاوم فلم يظهر نتائج متسقة أو ذات دلالة إحصائية عبر مستويات الجرعة المختبرة (Sui & Wang, 2025). وتؤكد هذه النتائج أن فعالية التمرين تعتمد على تفاعل معقد بين جرعة التمرين ونمطه، مما يستدعي توصيات مخصصة تأخذ في الاعتبار متطلبات النمط والقدرات الفردية (Sui & Wang, 2025).

محددات الجرعة حسب مكونات الوظيفة التنفيذية ونمط التمرين

تتباين محددات الجرعة المثلى باختلاف مكون الوظيفة التنفيذية المستهدف ونمط التمرين. فقد كشفت شبكة التحليل التلوي التي أجراها Han وآخرون (2025) عن أنماط محددة من الفعالية:

- التحكم التثبيطي: حقق التدريب المقاوم أكبر تحسن (SMD = 0.31، SUCRA = 82.1%)، خاصة مع جلستين أسبوعيا مدة كل منهما 45 دقيقة على مدى 12 أسبوعاً (Han et al., 2025).
- قدرة تبديل المهام (المرونة المعرفية) :كانت تمارين العقل-الجسد الأكثر فعالية (SMD = -0.58 ، SUCRA = 85.1%) (Han et al., 2025).
- الذاكرة العاملة: تفوقت تمارين العقل-الجسد أيضا (SMD = 2.45) مع بروتوكولات عالية التردد ومتوسطة المدة (Han et al., 2025).
- الوظيفة الإدراكية العامة: حقق التدريب المقاوم أكبر تحسن (SMD = 0.55) (Han et al., 2025).
- وظيفة الذاكرة: كانت التمارين الهوائية الأكثر فعالية (SMD = 0.42) (Han et al., 2025).

وتشير هذه النتائج إلى أن تحسين كل مكون من مكونات الوظائف التنفيذية يتطلب وصفة تمرين مختلفة، مما يدعم بقوة فكرة أن البرامج المخصصة (personalized) قد تكون أكثر فعالية من البرامج الموحدة. وقد خلص Han وآخرون (2025) إلى أن الوصفات التمرينية المخصصة - التي تركز على التدريب المقاوم للإدراك العام، وتمارين العقل-الجسد للوظيفة التنفيذية، والتمارين الهوائية للذاكرة - ينبغي أخذها في الاعتبار في السياقات السريرية والصحة العامة.

التباين في الاستجابة حسب الحالة السريرية

تتباين فعالية أنماط التمرين المختلفة بشكل حاسم حسب الحالة السريرية للفرد. ففي سياق الخرف، احتل التمرين المقاوم المرتبة الأولى في تعزيز الوظيفة التنفيذية (SUCRA = 89.2%)، يليه تمارين العقل-الجسد (SUCRA = 71.4%)، ثم التمارين الهوائية (SUCRA = 60.0%) (Zhu et al., 2025). وفي سياق مرض الزهايمر، أظهرت التحليلات أن التدخلات القائمة على التمرين ارتبطت بتحسينات صغيرة إلى متوسطة في الوظائف التنفيذية (SMD = 0.53) (Liu & Casasola, 2025).

أما في سياق الضعف الإدراكي الخفيف (MCI)، فقد أظهرت تمارين العقل-الجسد تحسينات في الوظيفة الإدراكية والتغيرات العصبية البلاستيكية، مع تغيرات واضحة في المناطق المعرضة للتنكس العصبي مثل الحصين والقشرة الحزامية الأمامية (H. Tian et al., 2025). كما أظهرت دراسة (2025) أن جلسة واحدة خفيفة إلى معتدلة الشدة يمكن أن تعزز بشكل حاد الوظيفة التنفيذية لدى المصابين بـ (Chang et al., 2025).

وتشير هذه النتائج إلى أن فعالية نمط التمرين تعتمد بشكل حاسم على الحالة السريرية للفرد، مما يستدعي تصميم تدخلات مخصصة تأخذ في الاعتبار التشخيص السريري وشدة الضعف المعرفي.

التأثيرات الحادة مقابل المزمنة

تجدر الإشارة إلى التمييز بين التأثيرات الحادة والمزمنة للنشاط البدني. فقد أظهرت دراسة (2025) أن التدريب المتقطع عالي الكثافة (HIIT) حقق تأثيرات مفيدة على الوظائف التنفيذية بحجم أثر أكبر من التدريب المستمر متوسط الشدة (MICT) لدى كبار السن الأصحاء، مع تأثيرات استمرت حتى 45 دقيقة بعد التمرين (Ahmadi et al., 2025). وأظهرت نتائج الدراسة فرقا معنويا في أوقات استجابة التبديل (Switching) بين MICT وHIIT، مع إظهار HIIT انخفاضاً أكبر في أوقات التبديل بعد 45 دقيقة ($p = 0.019$) (Ahmadi et al., 2025).

وفي سياق آخر، أظهرت دراسة (2025) أن جلسة واحدة (~10 دقائق) من التمرين البدني أو المعرفي أو المدمج يمكن أن تعدل أداء Stroop لدى كبار السن المصابين بـ MCI، مع الإشارة إلى أن التمرين في مهمة واحدة قد يكون أكثر فعالية للمكاسب المعرفية السريعة من البروتوكولات العقلية-الجسدية المدمجة لدى الأفراد المصابين بـ MCI (Ahmadi et al., 2025). غير أن التأثيرات الوقائية المستدامة تتطلب ممارسة منتظمة على المدى الطويل، حيث تتراكم التغيرات الهيكلية والوظيفية لتؤدي إلى حماية دائمة ضد التدهور المعرفي (W. Zhang et al., 2026).

التفاعل مع عوامل نمط الحياة الأخرى

لا يمكن فهم التأثيرات الوقائية للنشاط البدني بمعزل عن عوامل نمط الحياة الأخرى. فقد أظهرت دراسة Marent وآخرين (2025) أن سلوكيات الحركة على مدار 24 ساعة (النشاط البدني، السلوك الخامل، النوم) ترتبط بشكل مقطعي بالوظيفة المعرفية لدى البالغين الأصحاء البالغين 55

سنة فما فوق. وأظهرت النتائج أن إعادة تخصيص الوقت من النشاط البدني الخفيف أو النوم إلى السلوك الخامل ارتبطت أيضاً بدرجات أفضل في الوظيفة التنفيذية (Marent et al., 2025). غير أن إعادة تخصيص حتى 5 دقائق من النشاط البدني المعتدل-الشديد إلى أي سلوك آخر ارتبطت بانخفاض معنوي في درجات الذاكرة قصيرة المدى والوظيفة التنفيذية (Marent et al., 2025).

وتشير هذه النتائج إلى أهمية النظر في التفاعل بين النشاط البدني والسلوك الخامل والنوم عند تصميم التدخلات الوقائية، حيث قد يكون تقليل فترات الجلوس الطويلة بنفس أهمية زيادة النشاط البدني. كما أن اتباع نظام غذائي صحي، وإدارة الإجهاد، والتفاعل الاجتماعي، كلها عوامل تتفاعل مع النشاط البدني لتحديد مسار التدهور المعرفي المرتبط بالعمر.

الآثار السريرية والتطبيقية

التدخلات الوقائية في مرحلة البلوغ المتوسط

تشير الأدلة إلى أن علامات تدهور الوظائف التنفيذية تبدأ في الظهور بدءا من مرحلة البلوغ المتوسط (Ye et al., 2024)، وأن المشاركة في النشاط البدني تبدأ في الانخفاض في منتصف العمر (Ai et al., 2025). وتشير دراسة (2025) إلى أن الاتصال الوظيفي في حالة الراحة بين المناطق الرئيسية المرتبطة بالتحكم التثبيطي وتنظيم السلوك هو آلية عصبية محتملة كامنة وراء هذا الانخفاض المرتبط بالعمر في المشاركة في النشاط البدني (Ai et al., 2025). وتوصي الدراسات ببدء برامج النشاط البدني المنتظم في منتصف العمر، قبل أن يصبح التدهور المعرفي شديدا.

التدخلات في مرحلة الشيخوخة المتقدمة والسياقات السريرية

في مرحلة الشيخوخة المتقدمة، وحتى في سياق الضعف المعرفي الخفيف أو الخرف، يظل النشاط البدني تدخلا فعالا. وتشير الأدلة إلى أن:

- **للضعف الإدراكي الخفيف:** تمارين العقل-الجسد والتمارين متعددة المكونات فعالة في تحسين الوظيفة الإدراكية العامة والوظيفة التنفيذية (H. Tian et al., 2025).
- **للخرف:** التمرين المقاوم وتمارين العقل-الجسد هما الأكثر فعالية في تعزيز الوظيفة التنفيذية (Zhu et al., 2025).

- **لمرض الزهايمر:** التدخلات القائمة على التمرين ترتبط بتحسينات صغيرة إلى متوسطة في الوظائف التنفيذية (Liu & Casasola, 2025).
- **للتأثيرات الحادة:** جلسة واحدة من التمرين يمكن أن تعزز الوظيفة التنفيذية لدى كبار السن، مع إظهار HIIT تأثيرات أكبر من MICT (Ahmadi et al., 2025).

نحووصفات تمرين مخصصة

تؤكد الأدلة المتزايدة على ضرورة الانتقال من التوصيات العامة إلى الوصفات المخصصة (precision prescriptions) التي تأخذ في الاعتبار الخصائص الفردية للممارس. وتشمل هذه الخصائص العمر، ومستوى اللياقة البدنية الأساسي، والحالة الصحية (سليم، MCI، خرف، زهايمر)، والمكون التنفيذي المستهدف (التحكم التثبيطي، المرونة المعرفية، الذاكرة العاملة)، والتفضيلات الشخصية، والقيود الزمنية.

وتقدم النماذج الكمية للجرعة-الاستجابة، مثل تلك المطبقة في سياق مرض الزهايمر 1200-670 (MET-دقيقة/أسبوعياً)، إطاراً لتوجيه هذه الوصفات المخصصة (Sui & Wang, 2025). وقد أشار Han وآخرون (2025) إلى ضرورة دمج التدخلات التمرينية المنظمة في استراتيجيات الشيخوخة والوقاية من الخرف، مع اهتمام خاص بتصميم البروتوكول الأمثل واستهداف الفئات السكانية.

الخاتمة والتوجهات المستقبلية

يقدم هذا المقال مقاربة نظرية تحليلية متكاملة لدور النشاط البدني في حماية الوظائف التنفيذية من التدهور المرتبط بالعمر. تستند هذه المقاربة إلى أربع ركائز أساسية: أولا، الأدلة الوبائية والتجريبية المستمدة من الدراسات الطولية (Davoudi et al., 2025; Marent et al., 2025) والتحليلات التلوية (S. Tian et al., 2023; Ye et al., 2024; M. Zhang et al., 2023) وشبكات التحليل التلوي (Han et al., 2025; Zhu et al., 2025)التي تؤكد الفعالية الوقائية للنشاط البدني، مع تباين في الفعالية حسب نمط التمرين والمكون التنفيذي والحالة السريرية؛ ثانيا، الآليات العصبية الحيوية والفسيولوجية التي تشمل التغيرات الهيكلية (H. Tian et al., 2025)، وإعادة التنظيم الوظيفي للشبكات الدماغية (Chai et al., 2025; G. Li et al., 2025) ، والتأثيرات العصبية الكهربائية

(Sanchez-Lopez et al., 2025)، مع بروز نموذج "إعادة التخصيص الوظيفي الناتج عن التمرين" كإطار تفسيري واعد؛ ثالثا، محددات الجرعة التي تتباين باختلاف مكون الوظيفة التنفيذية ونمط التمرين والحالة السريرية، مع وجود علاقة غير خطية وجرعة مثلى تتراوح بين 670 و1200 MET-دقيقة/أسبوعيا (Sui & Wang, 2025)؛ ورابعا، التمايز في الاستجابة حسب العمر، حيث تكون التأثيرات الوقائية أكثر وضوحاً لدى الفئات العمرية المتقدمة (Han et al., 2025; S. Tian et al., 2023).

وتشير الأدلة إلى أن النشاط البدني يشكل استراتيجية غير دوائية واعدة للوقاية من التدهور التنفيذي المرتبط بالعمر، مع فوائد تمتد من مرحلة البلوغ المتوسط إلى الشيخوخة المتقدمة، وحتى في سياق الضعف المعرفي الخفيف والخرف ومرض الزهايمر. غير أن فعالية هذه الاستراتيجية تعتمد بشكل حاسم على تصميم البرامج وفقاً لمبادئ الجرعة المثلى والتخصيص الفردي، مع مراعاة الفروق في الاستجابة حسب نمط التمرين والمكون التنفيذي المستهدف والحالة السريرية.

وتوصي هذه المراجعة بعدة توجهات للبحوث المستقبلية:

أولاً، إجراء دراسات طولية موسعة لتحديد العلاقات السببية بين النشاط البدني والوظائف التنفيذية، ولتقييم التأثيرات الوقائية على المدى الطويل، مع اهتمام خاص بالتفاعل بين النشاط البدني والسلوك الخامل والنوم (Marent et al., 2025).

ثانياً، تطوير نماذج كمية للجرعة-الاستجابة تأخذ في الاعتبار التفاعلات بين متغيرات الجرعة المتعددة والمكونات التنفيذية المختلفة والفئات العمرية المتنوعة والحالات السريرية المختلفة. وقد أشار Zhang وآخرون (2023) إلى أن قليلا من التحليلات التلوية قد قيّمت الفوائد المعرفية المرتبطة بجميع متغيرات FITT-VP، مما يمثل فجوة بحثية مهمة.

ثالثاً، إجراء تجارب عشوائية تقارن بشكل مباشر بين أنماط التمرين المختلفة في العينة نفسها، لتحديد الأنماط الأكثر فعالية لكل سياق سريري وعمري، ولتأكيد النتائج المستمدة من شبكات التحليل التلوي(Han et al., 2025; Zhu et al., 2025).

رابعاً، توظيف تقنيات التصوير العصبي المتطورة (fMRI ، fNIRS ، EEG) لفهم الآليات العصبية المميزة لكل نمط تمرين ولكل مكون تنفيذي، ولتحديد المؤشرات الحيوية التي تتنبأ بالاستجابة

للتدخل. وقد أظهرت دراسات (Chai et al., 2025; G. Li et al., 2025) ودراسات ERP- (Sanchez-Lopez et al., 2025)إمكانات واعدة في هذا المجال.

خامساً، دراسة التفاعل بين النشاط البدني وعوامل نمط الحياة الأخرى (النظام الغذائي، النوم، إدارة الإجهاد، التفاعل الاجتماعي) لفهم كيفية تحسين التدخلات متعددة المجالات، مع التركيز على العلاقة بين النشاط البدني والسلوك الخامل (Marent et al., 2025).

سادساً، تصميم تدخلات مخصصة تأخذ في الاعتبار العوامل الوراثية، والخصائص الظاهرية، والخطوط الأساسية المعرفية، كما أوصى بذلك Zhu وآخرون (2025)، مع مراقبة التأثير العلاجي طويل المدى والتحقيق في آليات التدخل، مثل تنظيم العامل العصبي التغذوي المستمد من الدماغ واتصال القشرة الجبهية.

في الختام، يمكن القول إن النشاط البدني يمثل أداة قوية ومتاحة لتعزيز الصحة المعرفية والوظائف التنفيذية مع التقدم في العمر، وتتطلب الاستفادة المثلى منها فهما معمقا للآليات العصبية ومحددات الجرعة، مع الانتقال نحو توصيات مخصصة قائمة على الأدلة تراعي الفروق الفردية في العمر والحالة الصحية والمكون التنفيذي المستهدف.

المراجع

Ahmadi, S., Bélanger, M., O'Brien, M. W., Registe, P. P. W., Dupuy, O., & Mekari, S. (2025). Acute effects of high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training on executive functions in healthy older adults. *Scientific Reports, 15*(1), Article 6749. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91833-z

Ai, M., Tinney, E. M., España-Irla, G., Hillman, C. H., Kramer, A. F., & Morris, T. P. (2025). Brain resting-state functional connectivity mediates the age-associated decline in physical activity engagement. *The Journals of Gerontology: Series A, 80*(6), Article glaf075. https://doi.org/10.1093/gerona/glaf075

Chai, Q.-Y., Song, A.-Q., Zhao, Q.-Y., Shen, Q.-Q., & Cui, L. (2025). An ALE meta-analysis on the effects of neural changes due to exercise on executive function in a healthy population. *Scientific Reports, 15*(1), Article 34415. https://doi.org/10.1038/s41598-025-17431-1

Chang, Y.-K., Ren, F.-F., Li, R.-H., Ai, J.-Y., Kao, S.-C., & Etnier, J. L. (2025). Effects of acute exercise on cognitive function: A meta-review of 30 systematic reviews with meta-analyses. *Psychological Bulletin, 151*(2), 240–259. https://doi.org/10.1037/bul0000460

Davoudi, A., Donahue, P. T., Carlson, M. C., Dougherty, R. J., Wanigatunga, A. A., Freedman, V. A., & Schrack, J. A. (2025). Physical activity patterns and variability,

cognitive performance, and dementia in the National Health and Aging Trends Study. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 57*(6), 1221–1228. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003656

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135–168. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750

Fjell, A. M., & Walhovd, K. B. (2010). Structural brain changes in aging: Courses, causes, and cognitive consequences. *Reviews in the Neurosciences, 21*(3), 187–221. https://doi.org/10.1515/REVNEURO.2010.21.3.187

Giné-Garriga, M., Roqué-Fíguls, M., Coll-Planas, L., Sitjà-Rabert, M., & Salvà, A. (2014). Physical exercise interventions for improving performance-based measures of physical function in community-dwelling, frail older adults: A systematic review and meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 95*(4), 753–769.e3. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.11.007

Gomez-Pinilla, F. (2008). The influences of diet and exercise on mental health through hormesis. *Ageing Research Reviews, 7*(1), 49–62. https://doi.org/10.1016/j.arr.2007.04.003

Han, H., Zhang, J., Zhang, F., Li, F., & Wu, Z. (2025). Optimal exercise interventions for enhancing cognitive function in older adults: A network meta-analysis. *Frontiers in Aging Neuroscience, 17*, Article 1510773. https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1510773

Li, G., Liu, Y., Liu, C., Li, H., Tang, W., & Chen, A. (2025). Task-dependent neural effects of physical exercise: A systematic review and meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies. *Trends in Neuroscience and Education, 41*, Article 100274. https://doi.org/10.1016/j.tine.2025.100274

Li, H., Zhu, K., Gan, J., Wang, Z., Gao, Z., Liu, L., Guo, X., & Niu, J. (2025). The effects of Nordic walking on cognitive function in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Aging Neuroscience, 17*, Article 1666449. https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1666449

Liu, X., & Casasola, J. C. E. S. (2025). The effect of exercise on the improvement of verbal fluency, spatial working memory, and the three major executive functions in elderly Alzheimer's patients: A systematic review and meta-analysis. *Neurological Sciences, 46*(12), 6261–6276. https://doi.org/10.1007/s10072-025-08543-7

Livingston, G., Huntley, J., Sommerlad, A., Ames, D., Ballard, C., Banerjee, S., Brayne, C., Burns, A., Cohen-Mansfield, J., Cooper, C., Costafreda, S. G., Dias, A., Fox, N., Gitlin, L. N., Howard, R., Kales, H. C., Kivimäki, M., Larson, E. B., Ogunniyi, A., . . . Mukadam, N. (2020). Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission. *The Lancet, 396*(10248), 413–446. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30367-6

Marent, P.-J., Cardon, G., Dumuid, D., Albouy, G., & Van Uffelen, J. (2025). 24-hour movement behaviours are cross-sectionally associated with cognitive function in healthy adults aged 55 years and older. *Scientific Reports, 15*(1), Article 38619. https://doi.org/10.1038/s41598-025-22541-x

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49–100. https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734

Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The adaptive brain: Aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology, 60*, 173–196. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093656

Petersen, R. C. (2004). Mild cognitive impairment as a diagnostic entity. *Journal of Internal Medicine, 256*(3), 183–194. https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2004.01388.x

Petersen, R. C. (2011). Mild cognitive impairment. *New England Journal of Medicine, 364*(23), 2227–2234. https://doi.org/10.1056/NEJMcp0910237

Sanchez-Lopez, J., Silva-Pereyra, J., Sánchez-Moguel, S. M., Alatorre-Cruz, G. C., González-López, M., Sigg-Alonso, J. A., Pérez-Figueroa, M., & Fernández, T. (2025). Uncovering the link between incidental physical activity and inhibition of automatic responses in aging: An ERP study. *Frontiers in Aging Neuroscience, 17*, Article 1602114. https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1602114

Song, H., Feng, J., Wang, Y., Zhou, Q., Zhou, C., & Jin, J. (2025). fMRI insights into differential brain activation, executive function, and physical activity in older adults. *PLOS ONE, 20*(6), Article e0327163. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327163

Sui, S., & Wang, M. (2025). Optimizing exercise dosage for executive function in Alzheimer's disease: A Bayesian dose-response meta-analysis of randomized trials. *Archives of Gerontology and Geriatrics, 139*, Article 106001. https://doi.org/10.1016/j.archger.2025.106001

Tian, H., Yang, X., Li, J., Cheng, Y., Tian, S., Meng, F., Zhu, Q., Shen, Y., Wang, T., Guo, C., & Zhu, Y. (2025). The effect of mind–body exercise on cognitive function and neuroplasticity in elderly people with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Aging Neuroscience, 17*, Article 1683808. https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1683808

Tian, S., Liang, Z., Qiu, F., & Wang, X. (2023). Physical activity on executive function in sedentary individuals: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *PLOS ONE, 18*(12), Article e0294251. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294251

Ye, M., Song, T., Xia, H., Hou, Y., & Chen, A. (2024). Effects of aerobic exercise on executive function of healthy middle-aged and older adults: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Nursing Studies, 160*, Article 104912. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2024.104912

Zhang, M., Jia, J., Yang, Y., Zhang, L., & Wang, X. (2023). Effects of exercise interventions on cognitive functions in healthy populations: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews, 92*, Article 102116. https://doi.org/10.1016/j.arr.2023.102116

Zhang, W., Li, G., Teng, G., Ye, M., Liu, Z., Liu, Y., & Chen, A. (2026). Global executive function advantages in older adults with long-term habitual exercise are associated with resting-state functional reorganization. *GeroScience*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s11357-026-02224-9

Zhu, Y., Li, S., Xiao, Z., Wang, H., Zhang, X., Huang, Q., Yin, R., Guo, K., & Li, D. (2025). Effects of different physical activity interventions on executive function in older adults with dementia: A systematic review and network meta-analysis. *Frontiers in Neurology, 16*, Article 1643957. https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1643957