This article has been scanned by iThenticate No plagiarism detected

Volume 3, Issue 5, October 2021
p. 259-265

HEBB'S THEORY OF LEARNING IN COGNITIVE NEUROSCIENCE

<http://dx.doi.org/10.47832/2757-5403.5-3.23>

Ali Salim Rashid ALGHAFRI ¹

Abstract:

Donald Hebb who is the founder of theory of learning behavior from the perspective of cognitive neuroscience based on the cell assembly. Where he explained the occurrence of learning through the Hebb's synapse, which explained the mechanism of interaction and connection between synaptic cells, and the activity that occurs between them to produce learning and related thinking and memory. Also, how the induce that occurs between the cell assembly in the Hebb's synapse has a significant role to understand learning and associated skills, abilities and behavior. Therefore, this theory in the field of education and psychology was employed in the mechanism of long-term Potentiation (LTP) to interpret the occurrence of learning in terms of cognitive neuroscience.

Key words: Cognitive Neuroscience, Theory, Hebb, Learning, Teaching, Brain, Neurons.

Received :
19/08/2021

Accepted:
05/09/2021

Published:
01/10/2021

¹ Researcher, Sohar University, Sultanate of Oman, dr.aalghafri@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5574-8524>

نظرية هيب للتعليم في العلوم العصبية المعرفية

علي بن سالم بن راشد الغافري²

الملخص

دونالد هب (Donald Hebb)، هو من أسس نظرية سلوك التعلم من منظور العلوم العصبية المعرفية والمعتمدة على التجميع الخلوي. حيث فسر حدوث التعلم من خلال مشبك هيب الذي أوضح آلية التفاعل والاتصال بين المشابك العصبية والنشاط الذي يحدث بينها لإنتاج التعلم وما يرتبط به من عملية تفكير وذاكرة. وكيف أن الاستحثاث الذي يحدث بين خلايا التجميع الخلوي في مشبك هيب له دور كبير في فهم التعلم وما يرتبط به من مهارات وقدرات وسلوك. لذلك؛ وظفت هذه النظرية في مجال التربية وعلم النفس في آلية الفاعلية طويلة الأجل (Long-Term Potentiation - LTP) في تفسير حدوث التعلم من ناحية العلوم العصبية المعرفية.

الكلمات المفتاحية: علم الأعصاب المعرفي، العلوم العصبية المعرفية، نظرية، هيب، التعلم، التعليم، الدماغ، الخلايا العصبية.

المقدمة:

ذكر براون وميلنر، بأن هيب هو مؤسس فرضية مشبك هيب، وكتب نظرية تسمى بـ "سلوك التعلم" (Brown, 2020)، والتي فيها تم دمج العلوم العصبية المعرفية وعلم النفس من أجل فهم التعلم والتفكير والعاطفة (Brown & Milner, 2002). في هذه النظرية، تم افتراض كيفية ارتباط عملية تنظيم الدماغ المرتبطة بالسلوك لتحقيق أداء عمليات التعلم والذاكرة والتفكير (Posner & Rothbart, 2004). وما يؤيد ذلك ما تم ذكره في سونج (Seung, 2000):

"مشبك هب وإن كان قديماً فهو حتى بعد نصف قرن، نظريته بأكملها لا تزال ملهمة، لأن المشبك هو الإطار العام لربط السلوك بالتنظيم المشبكي من خلال ديناميكيات الشبكات العصبية، وهذا هو السبب في مزيد من الاستكشاف لأفكار هب لأنها الطريقة الواعدة لترجمة المعرفة المتراكمة لدينا حول الأحداث الجزيئية والخلوية للدونة المشبكية للوصول إلى فهم حقيقي للتعلم والذاكرة" (p. 1166)

لذلك من الأهمية بمكان إدراك الحاجة لدمج العلوم العصبية المعرفية في الجانب المعرفي والعاطفي والاجتماعي مع علم النفس؛ لأن العديد من النظريات النفسية في العصور المختلفة يمكن وضع الأدلة عليها وتفسيرها من خلال التصوير العصبي والدراسات الجينية المعاصرة المرتبطة بوظائف أجزاء الدماغ في جوانب التعلم والتفكير والعواطف والسلوك (Posner & Rothbart, 2004).

مشكلة الدراسة:

في ظل حالة تدهور علم النفس الفسيولوجي، ووجود رفض للمفاهيم الفسيولوجية في علم النفس. ورغم محاولات الكيمياء العقلية، وهيدروليكا العلاج النفسي، والمجالات المغناطيسية، ومعالجة المعلومات لتفسير السلوك والتفكير إلا أنها كانت متواضعة، ظهرت مشكلة فهم السلوك والتفكير؛ فركز دونالد هب (Donald Hebb) عليها باستخدام أدوات غير بيولوجية ذات خصائص مفهومة، وذكر بأنها مشكلة فهم الفعل الكلي للجهاز العصبي، فنادى إلى بذل الجهد في التخصصات العلمية والنفسية لحل هذه المشكلة العصبية والنفسية، فبدأ دونالد هب (Donald Hebb) في عام 1949م بجمع معلومات لكتابة نظرية عامة للسلوك تحاول سد الفجوة بين الفسيولوجيا العصبية وعلم النفس، فكان شرح هيب للسلوك البشري والحيواني والتفكير من حيث الجهاز الفعلي الذي ينتجها ألا وهو الدماغ والسلوك والعقل (Klein, 1999).

² الباحث، جامعة صحار، سلطنة عمان، dr.aalghafri@gmail.com

أهداف الدراسة:

- هذه الدراسة تستقصي نظرية هيب للتعليم في العلوم العصبية المعرفية؛ فهي تهدف إلى:
- الكشف عن نظرية هيب للتجميع الخلوي في المشبك العصبي.
 - تعرف بعض المقالات العلمية التي تطرقت إلى نظرية هيب للتجميع الخلوي ودورها في السلوك والتفكير والتعلم.
 - توضيح أهمية نظرية هيب للتجميع الخلوي في المشبك العصبي لتقليل الفجوة بين الفسيولوجيا العصبية وعلم النفس مجال علم النفس التربوي لتفسير السلوك والتفكير والتعلم.

أهمية الدراسة:

اكتسبت نظريته أهمية والمعروفة باسم "التجميع الخلوي" التي تشرح كيفية عمل الدماغ (Hendelman, 2006, p. ix). وعلاوة على ذلك، ساكوراي (Sakurai) الموثق في (Hebb, 2002: xix)، أشار إلى أن "نظرية هيب للتجميع الخلوي أصبحت أكثر أهمية لتوجيه البحوث وأيضاً مشبك هب هو المكون الرئيسي لنماذج التعلم". حيث أدرك هب أهمية دراسة الفروق الفردية في الذكاء والتأثير في التعلم والسلوك، لكن لم يكن في ذلك الوقت طرق لاستكشاف الجينات التي تعتبر مصدرًا مهمًا لتلك الفروق، كما أن الطرق التجريبية لربط النظام العصبي المفاهيمي بالواقع الحقيقي للدماغ البشري كانت غير كافية (Posner, & Rothbart, 2004).

منهجية الدراسة:

الدراسة الحالية تعتمد على المنهج الاستقرائي، فهذا المنهج ستنند إلى الاستنتاج من خلال وصف الموضوع بدقة، والانتقال من الجزء إلى الكل، من البدء بدراسة الجزئيات ثم يعمم النتائج على الكل عن طريق اتباع خطوات البحث العلمي (Gay, L. R., & Airasian). وبالتالي هذه الورقة تتناول تفسير نظرية هيب للتجميع الخلوي في المشبك العصبي وأهمية تقليل الفجوة بين المجالات المرتبطة بالدماغ وعلم النفس، وذلك من خلال أسلوب العرض القائم على سرد النقاط التي توضح ذلك.

نظرية هيب (Hebb) في التعلم:

هذه الورقة تحاول عرض بعض نتائج نظرية هيب (Hebb) في العلوم العصبية المعرفية المتعلقة بالتعلم التي أساسها التجميع الخلوي. هيب أجرى العديد من التجارب لتقديم نظريته العصبية في وظائف المشابك الدماغية. ودعى إلى أن حدوث التغييرات في الاستجابة في المشبك العصبي مهمة لتمثيل التعلم في الدماغ والتي تؤدي إلى فهم التعلم والذكاء والتفكير. وأشار إلى أن "النظرية النفسية لا يمكنها أن تذهب إلى أبعد من ذلك دون وجود أساس تفصيلي أكثر في حقيقة الفسيولوجية العصبية" (Brown & Milner, 2002: xiv)، مما أدى على تأكيد هيب على فهم ما يجري بين التحفيز والاستجابة من خلال الإدراك والتعلم والتفكير (Klein, 1999). وبالإضافة إلى ذلك، ذكر كل من براون وميلنر (Brown & Milner, 2002) أن هب وضّح آلية اللدونة المشبكية. وأكد على أنه من المهم زيادة نشاط المشبك العصبي ب تكرار عمل خلايا المشابك العصبية السابقة وبواسطة التحفيز المثابر والمستمر لخلية المشابك اللاحقة/ التالية. وذكر أن:

لنفترض أن استمرار أو تكرار النشاط العكسي أو الترددي (أو "الأثر") يميل إلى حدوث استحداث في التغييرات الخلوية الأخيرة التي تضيف إليه استقراره الدائم. ... فعندما يكون المحور العصبي للخلية (أ) قريباً بما فيه الكفاية للخلية المستثارة (ب) وبشكل متكرر أو مثابر/مستمر يأخذ دوره في إطلاق الشرارة، علماً بأن بعض عملية النمو أو عملية تغيير التمثيل الغذائي (التغيير الأيضي) تجري في واحدة أو كلا الخليتين، وبذلك فإن كفاءة الخلية (أ)، وباعتبارها واحدة من خلايا التي تؤدي إطلاق الشرارة للخلية (ب)، سيتم زيادتها (Hebb, 1945, p. 62).

أظهرت هذه الآلية كيفية أن زيادة المشبك العصبي يتأثر بواسطة النشاط المتزامن للخلية والذي له دور في معرفته أنواع التعلم المختلفة (Purves, et al., 2004). وتعرف عملية التعلم هذه باسم بالتعلم الهيببي (Hebbian learning)، والذي يتضمن مبدأ هب للتعلم (Milner, 2003). ويعرّف مبدأ هيب بأنه آلية التفاعل بين الخلايا العصبية على أساس التحفيز. فعندما يكون محور عصبي للخلية A (أ) قريباً بدرجة كافية لإثارة B (ب) ويشترك بشكل متكرر أو مستمر في

إطلاقه، تحدث بعض عمليات النمو أو التغيير الأيضي في خلية واحدة أو كليهما بحيث تكون كفاءة A كإحدى الخلايا التي تطلق B (Klein, 1999). حيث أن التفاعلات بين خليتين عصبيتين ستزيد عندما يتم تنشيط هاتان الخليتان العصبيتان في وقت واحد بشكل متزامن، في حين أن تفاعلها سينخفض بنسبة كبيرة إذا تم تفعيلهما بشكل منفصل. في حين، عندما يكون هناك تساوي في نشاط الخليتين العصبيتين، إما كلاهما إيجابياً على حد سواء أو سلبياً على حد سواء، فإن التفاعل الإيجابي القوي من شأنه أن ينتج، بينما إذا كان نشاط واحدة من تلك الخليتين العصبيتين إيجابياً والآخر سلبياً، فإن التفاعل السلبي سينشأ (Hebb, 2002).

ولمزيداً من التفصيل في منظور التعلم، فإن الشكل 1 يوضح في المرحلة (أ) إطلاق مجموعة الخلايا كطريقة لتمثيل المفهوم أو الإدراك على النحو الآتي: حيث أنه عند حدوث أي تحفيز خاص متكرر بشكل مستمر سيؤدي إلى التطور البطيء لـ "تجميع الخلية"، وهي بنية منتشرة تشتمل على الخلايا في القشرة والدمغ البيني، قادرة على العمل لفترة وجيزة كنظام مغلق، وكذلك تقديم التسهيلات لأنظمة أخرى مشابهة، حيث تمثل الأرقام المسارات العصبية المختلفة أما الأسهم فتتمثل التجميع الخلوي البسيط للمسارات العصبية وسلاسل إطلاقها أو تدفق المعلومات. لذلك قدمت نظرية التعلم الانتقائية المرتبطة بنظرية هيب مقابل نظرية التعلم البنائية فكرتين رئيسيتين لنمو ونضج مجموعات الخلايا وهما التحفيز والاستمرار (Li, Liu, & Tsien, 2016).

شكل 1:

آلية لتجميع الخلوي في المشبك العصبي لـ هيب

المصدر: (Li, Liu, & Tsien, 2016)

وقد لخص كلين (Klein, 1999) نظرية هيب للتجميع الخلوي في ثلاثة افتراضات محورية نصت عليها لحدوث نشاط

عملية التعلم، وهي:

- (1) تزيد الاتصالات بين الخلايا العصبية من الفعالية بما يتناسب مع درجة الارتباط بين نشاط ما قبل المشبكي وما بعد المشبكي.
- (2) تشكل مجموعات الخلايا العصبية التي تميل إلى إطلاق الشرارة معاً تجمعات خلوية يمكن أن يستمر نشاطه بعد الحدث المحفز ويعمل على تمثيله.
- (3) التفكير هو التنشيط المتسلسل لمجموعات التجمعات الخلوية.

ولذلك فإن ترميز مبدأ هيب للتعلم في برمجية الحاسوب مناسباً من أجل جعلها أكثر ملاءمة للنظرية ليتم محاكاتها واختبارها عن طريق الحاسوب (O'Reilly & Munakata, 2000). وبهذا المعنى، سيتم دعم اكتشاف شبكة الدماغ البشري بالإضافة إلى دعم أنواع التعلم المختلفة (Milner, 2003)، فمثلاً باستخدام نموذج Hebb، اتضح فشل كبار السن في تعلم معلومات التسلسل المرئي المكاني فوق الامتداد المتكرر (Turcotte, Gagnon, & Poirier, 2005)، بينما توصلت دراسة براسجولد (Brasgold, 2012) أن هذا النوع من التعلم لا يتغير بتأثير العمر. علاوة على ذلك، أكد (Hebb, 1945) على أن تعلم مهارات التفكير المعقدة والإجابة على مسائل حل مشكلات (التبرير) هو وظيفة نقل الخلايا العصبية. وكذلك وفقاً لـ هيب (Hebb, 1945: xxxviii)، "التفكير بلا شك له دلالة على درجة التعقيد البشري لوظيفة المخ" وهذا يرتبط بالتفاعل بين العمليات الحسية والحركية لإنتاج التركيب التفكير. وبالمثل، تركيب التفكير والذكاء يؤثر على قدرات الدماغ لإنتاج معلومات ذات جودة أفضل (Goswami, 2008). وفي الثلاثينيات وأوائل الأربعينيات من القرن الماضي، حاول دونالد أ. هب تطوير اختبارات الذكاء لتصبح أكثر دقة في القياس، طور اختبارات ذكاء يمكنها قياس آثار تلف الدماغ الموضعي في أعمار مختلفة لدى المرضى الذين لم يتلقوا

تعليماً (Brown, 2016)، بما في ذلك متاهة "Hebb-Williams"، والتي تم استخدامها لاحقاً لقياس ذكاء العديد من أنواعه المختلفة في منات الدراسات؛ مما جعل أفكار هب لها تأثيراً متزايداً على المهتمين بالعقل (العلوم المعرفية)، والدماع (العلوم العصبية المعرفية)، وكيفية تنفيذ الأدمغة لعمليات العقل (علم الأعصاب الإدراكي) (Klein, 1999). ذكر كلين (Klein, 1999) أنه في علم العلوم العصبية، يتوافق اقتراح الفاعلية طويلة المدى (الكمونية - Long-Term Potentiation LTP) مع "مشبك Hebb"، بينما في العلوم المعرفية هذا يوفر الفرضية التي يطلق عليها غالباً "قاعدة Hebb"، خوارزمية التعلم الأساسية لضبط أوزان الاتصال في نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية. في مجال التربية العصبية وعلم النفس العصبي، فإن آلية نظرية هيب تم استخدامها في توضيح آلية الفاعلية طويلة المدى (الكمونية - Long-Term Potentiation LTP) (Blakemore & Frith, 2005). آلية الفاعلية طويلة الأجل (LTP) تزيد من كفاءة المشبك العصبي وفاعليته عندما يحدث نشاط للخلايا العصبية. كما أن هناك حاجة لزيادة تركيز أيون الكالسيوم في المشبك العصبي البعدي لاستحثاث الفاعلية طويلة الأجل (LTP)، ويعتمد الحث على نشاط كل من المشبك العصبي القبلي الارتباطي والمشبك العصبي البعدي اللاقطبي (Montague & Sejnowski 1994)، حيث تسبب الفاعلية طويلة الأجل (LTP) اتصالات مشبكية عصبية داخل قرن آمون (الحصين)؛ الذي قد يؤدي هذا النوع من الاتصالات إلى التعلم والتفكير والذاكرة (O'Keefe, & Nadel, 1978)، ويذكر كونوي وإنجل (Conway, & Engle, 1996) بأن نموذج Hebb يعتمد على الذاكرة العاملة. خاصة وأنه فيما يتعلق بالعامل الكيميائي، قد تتضاعف كمية الإشارة الكيميائية التي تمر عبر خليتين عصبيتين عندما يتم تحفيزهما واتصالهما في نفس الوقت فيزداد حدوث التفاعل مما ينتج عنه عمليات مختلفة (Kandel, Schwartz, & Jessell, 2000)، من بينها عمليات التعلم ومهارات التفكير وقدراته وأنواع الذاكرة (Alghafri & Hairul, 2011). إن نظرية دونالد هب للتعلم شرحت كيفية تحويل مهمة التعلم إلى ذاكرة طويلة المدى؛ مما يساعد على الاحتفاظ بعادات التعلم تلقائياً بعد تكرارها المستمر؛ فمن خلال تواصل الخلايا العصبية في الدماغ من خلال عمليات النقل الجزيئية التي تقفز عبر نقاط الاشتباك العصبي أثناء التعلم، تنتج دائرة ذاكرة، تُعرف باسم التقوية طويلة المدى (LTP)، فكلما تكررت مهمة التعلم واستمر الإرسال باستمرار أصبحت دائرة الذاكرة أقوى.

الخلاصة:

إن اكتشاف وظائف أجزاء الدماغ والجهاز العصبي المرتبط بها من خلال الآليات والعمليات التي تحدث في تلك الأجزاء يساعد مجال التربية العصبية وعلم النفس العصبي اليوم في فهم التعلم وما يرتبط به من تفكير وسلوك لدى الفرد. وهذا ما قام به العالم هيب عندما استقصى المشابك العصبية وآلية عملها المرتبطة بالتعلم في نظريته المعروفة هيب للتعلم والمبدأ المرتبط بها، والذي قاد إلى استخدامها في معرفة كيفية تعلم الدماغ البشري بل وفي المحاكاة في البرمجة الحاسوبية. في الختام، إن اقتراح نظرية التعلم عند كل من هيب (Hebbian) و بياجيه (Piaget) مكملان لبعضهما البعض، فكل من الجانب العملي للعلوم العصبية المعرفية / علم الأحياء والجانب النظري لعلم النفس مهمان في فهم ودراسة التعلم والتفكير. وبهذا، كانت هناك نظرية الفاعلية طويلة الأجل (Long-Term Potentiation - LTP) التي أوضحت التعلم من الجانب العلوم العصبية في الدماغ البشري من خلال الاتصالات بين الخلايا العصبية لحدوث التعلم والتفكير والذاكرة. وخلاصة القول أن التركيز على عمليات الدماغ الخاصة بالسلوك والتعلم والتفكير هو المنظور المعاصر اليوم في التربية وعلم النفس.

استنتاجات الدراسة:

- ومن خلال العرض السابق في نظرية هيب للتجميع الخلوي في المشبك الخلوي بين العلوم العصبية المعرفية وعلم النفس، يمكن ذكر النقاط الآتية:
- النشاط الذي يحدث في المشابك العصبية في الدماغ وفق نظرية هيب للتجميع الخلوي لها علاقة ودور في سلوك الفرد وتفكيره وتعلمه.
- نظرية هيب للتجميع الخلوي في المشبك العصبي لها دور في تقليل الفجوة بين الفسيولوجيا العصبية وعلم النفس مجال علم النفس التربوي لتفسير السلوك والتفكير والتعلم.
- هناك إجماع من قبل المختصين بأهمية نظرية هيب للتجميع الخلوي للتعلم في العلوم العصبية المعرفية.

- أن آلية التفاعل بين الخلايا العصبية يكون لها أثر وفعالية في التعلم والسلوك والتفكير إذا ما اقترن ذلك بالتحفيز والتكرار والاستمرار والتزامن ونوع التفاعل (إيجابي أو سلبي) بين الخليتين في المشبك العصبي.
- أهمية تفاعلات الخلايا العصبية في الدماغ في الموقف لحدوث التعليم والتعلم وتكوين السلوك والتفكير.
- أن حدوث الجروح في خلايا الدماغ قد يعطل أو يقلل من حدوث السلوك والتعلم والتفكير.

التوصيات والدراسات المقترحة:

- يقترح البحث الحالي توصيات ودراسات ذات صلة بمحتوى هذا البحث، وهي:
- اقتراح استراتيجيات تعلم وبرامج إرشادية مبنية على نظرية هيب للتعلم.
- تضمين نتائج بحوث ودراسات نظرية هيب للتجميع الخلوي في المشبك العصبي في التعلم ومجال علم النفس.
- تجنب كل ما يسبب ضرر وتلف في الخلايا العصبية للدماغ لما من أثر على تعلم الفرد وسلوكه وتفكيره.
- تشجيع الباحثين في التربية وعلم النفس لاستقصاء التعلم من منظور نظرية هيب للتجميع الخلوي للتعلم، وخاصة في مجال الذكاء الاصطناعي والتقني.
- إجراء دراسة مقارنة بين تأثير كل من الدماغ البشري سليم الخلايا العصبية وذا التلف في الخلايا العصبية على التعلم.
- دراسة العلاقة بين نتائج البحوث في العلوم العصبية والدماغ والتربية وعلم النفس في عملية التعليم والتعلم.

Bibliography:

- Alghafri, A. S. & Hairul, I. (2011). The Effects of Neuroscience- and Non-Neuroscience-Based Thinking Strategies on Primary School Students' Thinking. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 15, 3291-3298.
- Blakemore, S.J., & Frith, U. (2005). *The learning brain: Lessons for education*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Brasgold, M. (2012). The role of attention and response based learning in the visuospatial Hebb supra-span sequence learning task: Investigating age-related learning deficits (Order No. NR98267). Available from ProQuest Central. (1365704901). <https://elib.soharuni.edu.om:2101/dissertations-theses/role-attention-response-based-learning/docview/1365704901/se-2?accountid=136209>
- Brown R. E., & Milner P. M. (2002). Foreword. In Donald Olding Hebb, *the organization of behaviour, a neuropsychological Theory* (reprinted). Mahwah, London: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- Brown, R. E. (2016). Hebb and cattell: The genesis of the theory of fluid and crystallized intelligence. *Frontiers in Human Neuroscience*, doi:<http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2016.00606>
- Brown, R.E. (2020). Donald O. Hebb and the Organization of Behavior: 17 years in the writing. *Mol Brain* 13, 55. <https://doi.org/10.1186/s13041-020-00567-8>
- Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (1996). Individual differences in working memory capacity: More evidence for a general capacity theory. *Memory*, 4, 577–590.
- Goswami, U. (2008). Principles of learning, implications for teaching: A cognitive neuroscience perspective. *Journal of Philosophy of Education*, 42(3-4), 381-399.
- Hebb, D.O. (1945). *The Organization of behaviour*. Wiley: New York.

- Hebb, D.O. (2002). *The Organization of Behaviour, a Neuropsychological Theory* (reprinted). Mahwah, London: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- Hendelman, W. (2006). *Atlas of functional neuroanatomy*, (2nd Ed.). US: Taylor & Francis Group.
- Kandel, E.R.; Schwartz, J.H., & Jessell, T.M. (2000). *Principles of neural science*, (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Klein, R. M. (1999). The Hebb Legacy. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 53(1), 1-3.
- Li, M., Liu, J., & Tsien, J. Z. (2016). Theory of connectivity: Nature and nurture of cell assemblies and cognitive computation. *Frontiers in Neural Circuits*, 10, 34. doi:<http://dx.doi.org/10.3389/fncir.2016.00034>
- Milner, P. (2003). A brief history of the Hebbian Learning Rule. *Canadian Psychology*, 44(1), 5-9.
- Montague, P. R., & Sejnowski, T. J. (1994). The predictive brain: Temporal coincidence and temporal order in synaptic learning mechanisms. *Learning & Memory* (Cold Spring Harbor Laboratory Press), 1(1), 1-33.
- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. UK: Oxford University Press.
- O'Reilly, R. C., & Munakata, Y. (2000). *Computational explorations in cognitive neuroscience: Understanding the mind by simulating the brain*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2004). Hebb's neural networks support the integration of psychological Science¹. *Canadian Psychology*, 45(4), 265-278.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., & Williams, S. M. (2004). *Neuroscience*, (3th ed.). Massachusetts U.S.A.: Sinauer Associates, Inc.
- Seung, S. (2000). Half a century of Hebb. *Nature Neuroscience*, supplement, 3, 1166.
- Turcotte, J., Gagnon, S., & Poirier, M. (2005). The Effect of Old Age on the Learning of Supraspan Sequences. *Psychology and Aging*, 20(2), 251-260.
- Bergeron, J., (2019, Jan 22). *A memory pill? cognitive neuroscience's contributions to the study of memory*. The Canadian Press, McGill University.