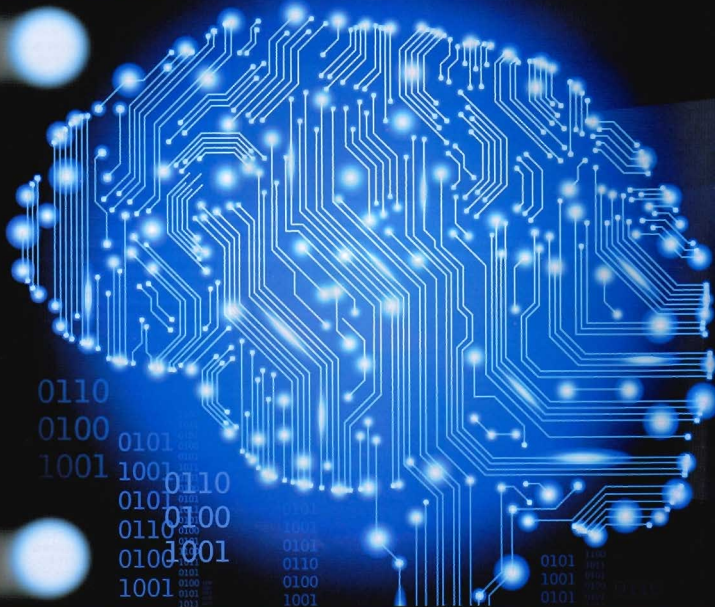




ΧΑΡΗΣ Β. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Ερευνήτης Πληροφορικής, M.Sc., Ph.D.



Πώς λειτουργεί η πιο πολύπλοκη μηχανή στο σύμπαν;

Προσομοιώνοντας τον ανθρώπινο εγκέφαλο

Από τις πρώτες αυτόματες μηχανές υπολογισμών του 19ου αιώνα μέχρι και τους σημερινούς υπερυπολογιστές, κάθε φορά που ένα τεχνητό δημιούργημα αποδεικνύεται ταχύτερο ή ακριβέστερο από τον άνθρωπο, τίθεται βασανιστικό το αναπάντητο ερώτημα: μπορεί μια μηχανή να ξεπεράσει την ανθρώπινη νοημοσύνη; Σήμερα, οι επιστήμονες στρέφονται σε ένα άλλο, λιγότερο φιλοσοφικό και περισσότερα πρακτικό ερώτημα: μπορεί ένας πλήρης ανθρώπινος εγκέφαλος να προσομοιωθεί με κάθε λεπτομέρεια μέσα σε μια μηχανή; Η απάντηση όχι μόνο φαίνεται πως είναι θετική, αλλά η υλοποίησή της υποθρούνει χρονικά σε μόλις μερικά χρόνια από σήμερα.



Μετά από αρκετές δεκαετίες στασιμότητας και σχετική απογοήτευσης στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει ανανεωθεί σημαντικά, λόγω της παράλληλης εξέλιξης σε δύο μέτωπα: στην επιστήμη, με νέους εξαιρετικά αποδοτικούς αλγόριθμους Μηχανικής Μάθησης, και στην τεχνολογία, με τη ραγδαία αύξηση των δυνατοτήτων και της διαθέσιμης επεξεργαστικής ισχύος των υπολογιστών με πολύ χαμηλό πλέον κόστος. Μέθοδοι και τρόποι επεξεργα-

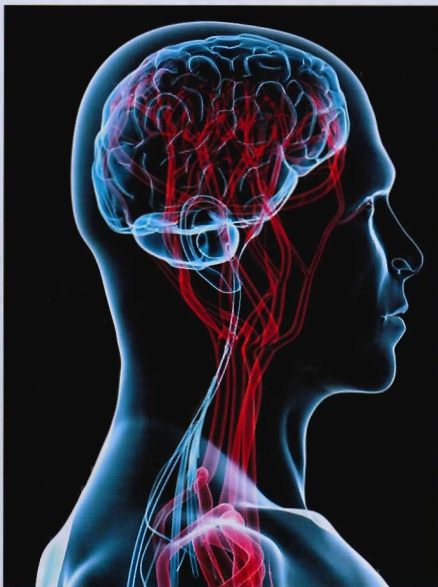
σίας που προσομοιάζουν όλο και περισσότερο στα πραγματικά δίκτυα των διασκατομμυρίων νευρώνων του εγκεφάλου, έχουν αρχίσει να προσφέρουν ρεαλιστικές λύσεις σε δύσκολα προβλήματα όπου η ανθρώπινη ευφυΐα υπερτερούσε αποφασιστικά έναντι του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αυτό που μόλις πριν λίγα χρόνια φαινόταν απραγματοποίητο όνειρο, σήμερα οι ερευνητές είναι σε θέση να το υλοποιήσουν και να μελετήσουν τη λειτουργία του σε ρεαλιστικά χρονικά πλαίσια.

Ταυτόχρονα στον τομέα των Νευροεπιστημών, της μελέτης δηλαδή της οργάνωσης και λειτουργίας του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος γενικότερα, η διαθεσιμότητα όλο και πιο προσιτών υπερυπολογιστών με τεράστιες δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων, καθιστά πλέον ρεαλιστική την προσέγγιση του προβλήματος, με όρους μερικής ή πλήρους προσομοίωσης, ενός τόσο σύνθετου μηχανισμού όπως ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Μόλις πρόσφατα, βιολόγοι ερευνητές κατάφεραν να προσομοιώσουν σε υπολογιστή ένα πλήρες μοντέλο κτυπάρου σε μοριακό επίπεδο, κάτι που μόλις πριν μερικά χρόνια φαινόταν αδιανόητο. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από δισεκατομμύρια νευρικά κύτταρα, τα οποία διασυνδέονται μέσω χιλιάδων συνάψεων μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα πολυστρωματικό νευρικό ιστό ασύλληπτης πολυπλοκότητας, μέσω του οποίου ανοδύονται με σχεδόν «μαγικό» τρόπο η ικανότητα δράσης, ομιλίας, γεύσης, έκφρασης, φαντασίας, μνήμης, συνειδητότητας, και γενικά κάθε ανώτερης γνωστικής διαδικασίας που με μια λέξη ονομάζεται ανθρώπινη νόηση. Είναι άραγε δυνατό να προσομοιωθεί μια τόσο πολύπλοκη «μηχανή» στα κυκλώματα ενός υπερυπολογιστή;

ΤΟ ΜΥΣΤΗΡΙΩΔΕΣ «ΜΑΥΡΟ ΚΟΥΤΙ»

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελεί ίσως το πιο πολύπλοκο σύστημα που γνωρίζουμε σήμερα στο σύμπαν. Αν και ο άνθρωπος είναι το βιολογικό ον με το υψηλότερο επίπεδο νοημοσύνης και συνείδησης, ο εγκέφαλός του αντιστοιχεί μόλις στο 2% του μέσου σωματικού βάρους, δηλαδή λιγότερο από 2 κιλά. Παρ' όλα αυτά, δεσμεύει το 15% της καρδιακής λειτουργίας και τροφοδοτείται μέσω του αίματος με το 20% του οξυγόνου και το 25% της γλυκόζης που χρησιμοποιεί και καταναλώνει συνολικά ο μέσος άνθρωπος οργανισμός. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια το πλήθος των νευρικών κυττάρων που τον αποτελούν, υπολογίζεται όμως ότι οίγουρα ο ανθρώπινος εγκέφαλος περιλαμβάνει περίπου 100 δισεκατομμύρια νευρώνες.

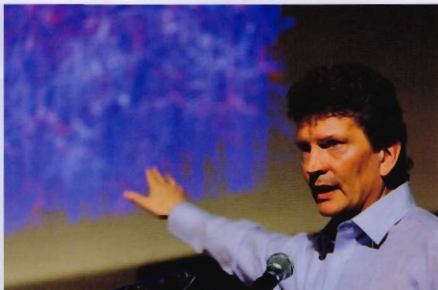
Ως μεμονωμένη μονάδα επεξεργασίας, κάθε νευρώνας δέχεται ως είσοδο ερεθίσματα μέσω των συνάψεων από άλλους νευρώνες.



Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελεί ίσως το πιο πολύπλοκο σύστημα που γνωρίζουμε σήμερα στο σύμπαν. Αν και ο άνθρωπος είναι το βιολογικό ον με το υψηλότερο επίπεδο νοημοσύνης και συνείδησης, ο εγκέφαλός του αντιστοιχεί μόλις στο 2% του μέσου σωματικού βάρους, δηλαδή λιγότερο από 2 κιλά. Παρ' όλα αυτά, δεσμεύει το 15% της καρδιακής λειτουργίας και τροφοδοτείται μέσω του αίματος με το 20% του οξυγόνου και το 25% της γλυκόζης που χρησιμοποιεί και καταναλώνει συνολικά ο μέσος άνθρωπος οργανισμός.

λους νευρώνες, ενώ αντίστοιχα το αποτέλεσμα της «επεξεργασίας» από τον συγκεκριμένο νευρώνα διχοχεται με άλλων συνάψεων στις εισόδους γειτονικών νευρώνων. Υπολογίζεται πως κάθε νευρώνας διαθέτει συνάψεις των οποίων το πλήθος κυμαίνεται από 1.000 έως και 10.000, ανάλογα με το τμήμα του εγκεφάλου και τη λειτουργία του. Κάθε σύναψη στην ουσία λειτουργεί ως μεταδότη «είσοδος» στη μονάδα επεξεργασίας, ενώ η φύση και η πυκνότητα ειδικών χημικών ενώσεων που ονομάζονται νευροδιαβαστές καθορίζουν την ισχύ και τη διάρκεια του ερεθίσματος. Επιπλέον, κάθε νευρώνας περιλαμβάνει έναν εσωτερικό μηχανισμό επιλεκτικής ενεργοποίησης, μόνο όταν το συνολικό ερέθισμα στις εισόδους υπερβαίνει κάποιο όριο, και μάλιστα υπό τη μορφή παλιών μικρής χρονικής διάρκειας. Έτσι, κάθε νευρώνας λειτουργεί τελικά ως «διακόπτης», εσωτερικά αναλογικής (ηλεκτροχημικής) αλλά ουσιαστικά σχεδόν ψηφιακής λειτουργίας ως προς το συνολικό αποτέλεσμα, ο οποίος συνδέεται τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο με τεράστιο πλήθος παρόμοιων μονάδων, με τη μορφή ενός εξαιρετικά σύνθετου δικτύου ανταλλαγής μηνυμάτων.

Ο λόγος που τα λεγόμενα «νευρωνικά δίκτυα» (neural networks) εμφανίζουν αυτή την εξαιρετικά σύνθετη συμπεριφορά ως σύνολο, έγκειται ακριβώς στην πολύπλοκη διασύνδεσή τους και στον μη γραμμικό τρόπο λειτουργίας τους: ενώ αρχικά η εσωτερική επεξεργασία σε κάθε νευρώνα φαίνεται να είναι απλά ένα σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων του (κάθε ερέθισμα συνυπολογίζεται σύμφωνα με το «βάρος» της αντίστοιχης σύναψης), η ύπαρξη του ορίου ενεργοποίησης και η επιλεκτική παραγωγή ή όχι ενός παλμού στην έξοδο δημιουργεί τελικά τη σύνθετη λειτουργία που αποτελεί τη βάση αυτού που ονομάζουμε «μάθηση». Πρακτικά, η ενεργοποίηση ή όχι ενός συγκεκριμένου νευρώνα βασίζεται ακριβώς στα «βάρα» των συνάψεων στην είσοδο. Δηλαδή στο πόσο ισχυρές είναι οι βιοχημικές συνδέσεις του με άλλους γειτονικούς νευρώνες. Όταν οι συνδέσεις αυτές δεν είναι ισχυρές, ο νευρώνας παραμένει «ανενεργός», ενώ όταν αυτές ενισχύονται, τυπικά από μια σειρά ερεθισμάτων που αποτυπώνουν «γνώση» [βλεπόμενα από εικόνες, ήχους, κλπ.], ο νευρώνας «μαθαίνει» να ενεργοποιείται όταν αργότερα παρουσιαστούν παρόμοια μορφή ερεθίσματα στην είσοδο.



Ο Henry Markram είναι επικεφαλής του προγράμματος Human Brain Project (HBP) το οποίο έχει εξασφαλίσει χρηματοδότηση 1 δισεκατομμυρίου ευρώ για 12 χρόνια. Μέχρι το 2025 προβλέπεται να έχει ολοκληρωθεί η πρώτη πλήρης προσομοίωση ανθρώπινου εγκεφάλου σε μοριακό επίπεδο, προσφέροντας εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες για τον ακριβή τρόπο λειτουργίας των νευρώνων και των συνάψεων.

Η πλήρης λειτουργία των νευρώνων του εγκεφάλου βασίζεται σε εξαιρετικά σύνθετες διεργασίες σε βιοχημικό, ηλεκτρικό, ακόμα και πληροφοριακό επίπεδο. Κάποιες σύγχρονες θεωρίες, όπως αυτές που έχει διατυπώσει ο διάσημος φυσικός Roger Penrose, υποστηρίζουν πως μεταξύ των δονδριτών (φυσικών συνδεδεμένων μεταξύ των νευρώνων) λυμβάνουν χώρα φαινόμενα κβαντικής αλληλεπίδρασης, οπότε είναι ουσιαστικά αδύνατο να προβλέψουμε την ακριβή κατάσταση και το πληροφοριακό περιεχόμενο των σημάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των νευρώνων. Παρ' όλα αυτά, η εξαιρετικά απλοποιημένη μορφή, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, μπορεί να εφαρμοστεί ως βάση για επιτυχημένα μοντέλα προσομοίωσης νευρώνων σε υπολογιστή.

Η ΚΟΥΡΣΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

Από τη στιγμή της εμφάνισης των πρώτων, αρχικά ηλεκτρο-μηχανικών και αργότερα αμιγώς ηλεκτρονικών, προγραμματιζόμενων υπολογιστών κατά τις δεκαετίες του 40 και του 50, ήταν αναπόφευκτη η σύγκρισή τους με τις δυνατότητες του ανθρώπου σε ό,τι αφορά τις ικανότητες επεξεργασίας και κυρίως ως προς τη «νοημοσύνη». Φυσικά, οι υπολογιστές της εποχής δεν μπορούσαν καν

να προσεγγίσουν τις δυνατότητες ενός μέσου ανθρώπου σε απλές καθημερινές δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα η σύνταξη κειμένων ή η κατανόηση εικόνας, όμως έγινε γρήγορα αντιληπτό πως σε ό,τι αφορά την αριθμητική επεξεργασία δεδομένων, οι υπολογιστές ήταν ήδη ταχύτεροι και ακριβέστεροι από τον άνθρωπο. Πώς ήταν δυνατό μια μηχανή να μπορεί να εκτελεί πολλές χιλιάδες πράξεις το δευτερόλεπτο αλλά να αδυνατεί να «κατανοήσει» τη διαφορά μεταξύ ενός μύλου και ενός πορτοκαλιού;

Κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, και σχεδόν μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 80, υπήρξε τεράστιο ενδιαφέρον από τις μεγάλες δυνάμεις, ιδιαίτερα της ΗΠΑ, για την εξέλιξη των υπολογιστών και την ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η ιδέα πως ένας υπολογιστής θα μπορούσε να προγραμματιστεί κατάλληλα ώστε να μπορεί να υπερτερεί σε επίπεδο στρατηγικής και ταχύτητα λήψης των βέλτιστων αποφάσεων, αποτέλεσε ισχυρότατο κίνητρο προκειμένου να διατεθούν τεράστιο χρηματικό ποσό και ανθρώπινο επιστημονικό δυναμικό με στόχο να εκφραστεί πως ακριβώς θα μπορούσε να επιτευχθεί κάτι τέτοιο. Όπως όμως έγινε φανερό, η εξέλιξη των υπολογιστών σε καθαρά τεχνολογικό επίπεδο ήταν πολύ πιο γρήγορα απ' ό,τι σε βάθος κατανόηση της έννοιας της «νοημοσύνης», δηλαδή της ανθρώπινης



Οι εγκαταστάσεις του υπερπολογιστή Blue Gene/P ή αλλιώς «Dawn» που ανέπτυξε η IBM για το πρόγραμμα SyNPASE της υπηρεσίας DARPA. Μέχρι σήμερα έχουν προσομοιωθεί επιτυχώς «εικονικοί» εγκέφαλοι που περιλαμβάνουν έως και 1,6 δισεκατομμύρια νευρώνες και 8,87 τριακατομμύρια συνάψεις, περίπου το 4,5% ενός πλήρους ανθρώπινου εγκέφαλου ή το 100% του εγκέφαλου μιας γάτας.

ικανότητας λήψης «έξυπνων» αποφάσεων. Διαπιστώθηκε ότι η κατασκευή ενός πραγματικού «έξυπνου» υπολογιστή ήταν πολύ δυσκολότερο εγχείρημα απ' ό,τι είχε αρχικά εκτιμηθεί και μάλιστα η κύρια δυσκολία εντοπιζόταν όχι στην ταχύτητα ή στη χωρητικότητα της μνήμης του αλλά στο λογισμικό που θα υλοποιούσε τις εσωτερικές διεργασίες επεξεργασίας των δεδομένων. Έτσι, για κάποια χρόνια, η έννοια της Τεχνητής Νοημοσύνης ταυτίστηκε με ανεκπλήρωτες προσδοκίες, αμέτρητα θεωρητικά μοντέλα και λίγες πρακτικές εφαρμογές, συχνά περιορισμένες και από τις ίδιες τις δυνατότητες της τότε τεχνολογίας.

Από τα τέλη της δεκαετίας του 80 και τις αρχές της δεκαετίας του 90 υπήρξε μια σημαντική αλλαγή: η τεχνολογία είχε γίνει πλέον τόσο φθηνή που επέτρεψε την εμφάνιση «προσωπικών» επιτραπέζιων υπολογιστών με δυνατότητες παρόμοιες με εκείνες αντίστοιχων μηχανών που μέχρι πριν 10-15 χρόνια χρειαζόνταν ολοκληρωμένες κτηριακές εγκαταστάσεις, απαιτούσαν χιλιάδες φορές μεγαλύτερη κατανάληψη ενέργειας και προγραμματίζονταν με απίστευτα πιο δύσκολο τρόπο.

Το σημαντικότερο όμως βήμα εξέλιξης ήταν το κόστος, το οποίο ακολουθούσε ακριβώς τη συρρίκνωση του μεγέθους. Οποιοσδήποτε μπορούσε πλέον, με περίπου 1.000 δολάρια, να έχει στην κατοχή του έναν πλήρως προγραμματιζόμενο υπολογιστή, με ταχύτητα και μνήμη που επέτρεπε την υλοποίηση μοντέλων και αλγορίθμων της Τεχνητής Νοημοσύνης τα οποία μέχρι τότε θεωρούσαν υπερβολικά απαιτητικά και δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν στην πράξη.

Εκείνη την εποχή άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους και το πρώτα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ), απλοποιημένα μοντέλα των πραγματικών νευρωνικών δικτύων του εγκέφαλου, προσομοιωμένα σε λογισμικό και με δυνατότητες που μέχρι τότε φαινόταν υπερβολικά δύσκολο να επιτευχθούν. Μέσω προγραμμάτων ΤΝΔ, οι υπολογιστές μπορούσαν πλέον να αρχίζουν να προσομοιώνουν, σε πολύ απλό ακόμη επίπεδο, ανώτερες λειτουργίες του εγκέφαλου όπως η αναγνώριση κειμένου, η μετατροπή ομιλίας σε γραπτό κείμενο, μέχρι και κάποιες πολύ απλές διαγνωστικές εφαρμογές ιατρικής. Τα ΤΝΔ αποτέλεσαν το πιο σημαντικό ί-

σως παράδειγμα «αναγέννησης» της Τεχνητής Νοημοσύνης η οποία, ταυτόχρονα με τη ραγδαία εξέλιξη και την πτώση του κόστους της αντίστοιχης τεχνολογίας, άρχισε και πάλι να στρέφεται προς την ιδέα της προσομοίωσης του συνόλου των ανώτερων λειτουργιών του ανθρώπινου εγκέφαλου.

ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος και ο πολυπλοκότητα του προβλήματος της προσομοίωσης της ανθρώπινης νόησης σε έναν υπολογιστή, αρκεί να λάβει κανείς υπόψη του μερικά αριθμητικά δεδομένα. Όπως προαναφέρθηκε, ο μέσος ανθρώπινος εγκέφαλος περιλαμβάνει περίπου 100 δισεκατομμύρια νευρώνες (10^{11}), καθένας από τους οποίους συνδέεται στην είσοδό του, μέσω έως και 10.000 (10^4) συνάψεων, με άλλους γειτονικούς νευρώνες. Αυτό σημαίνει πως κάθε νευρώνας εκτελεί ουσιαστικά τόσους «αναλογικούς» πηλλαστισμούς και αδροίσματα όσες και οι συνάψεις εισόδου, ενώ επιπλέον υ-

πάρχει και η εσωτερική διαδικασία «κατωφλίωσης» και επιλεκτικής ενεργοποίησης ή όχι στην έξοδο. Αν αυτό γενικευτεί για όλους τους νευρώνες του εγκεφάλου, διαπιστώνεται εύκολα ότι απλά και μόνο ένας «κύκλος» επεξεργασίας απαιτεί αριθμητικές πράξεις των οποίων το πλήθος ξεπερνά τα 1 τετράκις εκατομμύριο ($10^{11} \times 10^4$). Επιπλέον, γνωρίζουμε πως κάποιες λειτουργίες, όπως για παράδειγμα η κατανόηση εικόνων και ήχων ή η αναγνώριση προσώπων, συμβαίνει πολλές φορές (15-25) κατά τη διάρκεια ενός δευτερολέπτου.

Καθώς η λειτουργία του εγκεφάλου σε επίπεδο νευρώνων βασίζεται σε ηλεκτρικά σήματα, ευαίσθητοι αισθητήρες είναι δυνατόν να μετρήσουν τις ελάχιστες αυτές διαφορές ηλεκτρικού δυναμικού καθώς διαδίδονται μέχρι την επιφάνεια του εγκεφάλου και διαπερνούν το κρανίο. Τεχνολογίες όπως το κλασικό ηλεκτρο-εγκεφαλογράφημα (Electroencephalography - EEG) ή το μαγνητο-εγκεφαλογράφημα (Magnetoencephalography - MEG) δίνουν τη δυνατότητα της καταγραφής, σε πραγματικό χρόνο, της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Ανάλογες τεχνολογίες τριτοβάθμιας απεικόνισης, όπως για παράδειγμα η μαγνητική τομογραφία (MRI) και κυρίως η λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI) προσφέρουν τη δυνατότητα της δυναμικής παρατήρησης της λειτουργίας του εγκεφάλου ακριβώς τη στιγμή της ενεργοποίησης κάποιας περιοχής από ένα ερέθισμα, της εκτέλεσης μιας αριθμητικής πράξης ή της ανάκλησης μιας μνήμης. Ωμως, οι τεχνολογικοί περιορισμοί, τόσο στην καταγραφή όσο και στον όγκο επεξεργασίας των παραγόμενων σημάτων, καθιστά σχεδόν αδύνατο να απεικονιστούν οι διεργασίες αυτές σε πραγματικό χρόνο και σε ανάλυση καλύτερη των 3 κυβικών χιλιοστών (που ισοδυναμεί περίπου με ένα εκατομμύριο νευρώνες). Καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται και οι τρόποι επεξεργασίας βελτιώνονται, αναμένεται ότι οι διερευνητικές αυτές μέθοδοι θα γίνουν ολοένα και ακριβέστερες μέσα στα επόμενα χρόνια.

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα συμπεράσματα που προκύπτει από τη μελέτη αυτών των σημάτων είναι πως ο εγκέφαλος δεν βρίσκεται ποτέ σε απόλυτη «παύση». Ακόμα και σε κατάσταση βαθιάς ύπνου ή ακόμα και κώματος, υπάρχει σημαντική δραστηριότητα σε διάφορες περιοχές του. Επίσης, είναι ε-

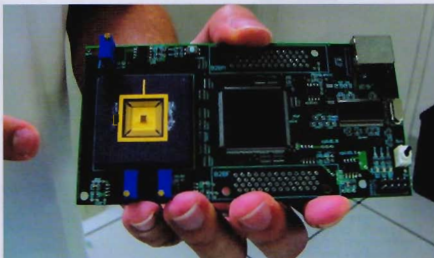
Καθώς η λειτουργία του εγκεφάλου σε επίπεδο νευρώνων βασίζεται σε ηλεκτρικά σήματα, ευαίσθητοι αισθητήρες είναι δυνατόν να μετρήσουν τις ελάχιστες αυτές διαφορές ηλεκτρικού δυναμικού καθώς διαδίδονται μέχρι την επιφάνεια του εγκεφάλου και διαπερνούν το κρανίο.

ξαιρετικά ενδιαφέρον το γεγονός ότι, όπως έχει παρατηρηθεί, η μεγαλύτερη συχνότητα των σημάτων αυτών, δηλαδή η ταχύτερα εξελισσόμενη διεργασία στον εγκέφαλο, δεν ξεπερνά κατά κανόνα τους 50-60 παλμούς το δευτερόλεπτο (Hz). Είναι, λοιπόν, φανερό ότι αν αυτή θεωρηθεί ως «συχνότητα λειτουργίας» του εγκεφάλου, η θωρόσηση του σύγχρονου υπολογιστή με αρχιτεκτονική κεντρικού επεξεργαστή και κεντρικού χρονισμού (μερικών GHz, δηλαδή δισεκατομμυρίων Hz) είναι εντελώς ασύμβατη με την πραγματική δομή και οργάνωση των νευρώνων: ο εγκέφαλος είναι σε θέση να δέχεται αυτόν τον τεράστιο όγκο ερεθισμάτων και να τα επεξεργάζεται με τέτοια ασύλληπτη ταχύτητα, όχι επειδή λειτουργεί ως ένας απίστευτα γρήγορος υπολογιστής, αλλά επειδή τα δίκτυα των νευρώνων του λειτουργούν με μαζικά παράλληλο τρόπο, αν και σε εξαιρετικά χαμηλή συχνότητα.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις είναι εξαιρετικά χρήσιμες και καθοριστικές σε

ό,τι αφορά το πώς μπορεί ένα προς πλήρη ανθρώπινο εγκέφαλος να προσομοιωθεί με κάθε λεπτομέρεια σε έναν υπολογιστή. Με έναν απλό υπολογισμό, διαπιστώνεται εύκολα πως ένας τέτοιος υπολογιστής χρειάζεται μνήμη περίπου 1.000.000 φορές μεγαλύτερη από αυτή που διαθέτει σήμερα ένας ισχυρός υπολογιστής γραφείου (1 τετράκις εκατομμύρια συνάψεις = 10^{15} παράμετροι δεκαδικής ακρίβειας, μόνο για την κατασκευή των νευρωνικών δικτύων, χωρίς τα ερεθίσματα από το περιβάλλον).

Το 1997 ο Hans Moravec, εξέχων ερευνητής στο Ινστιτούτο Ρομποτικής στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon (ΗΠΑ), πραγματοποίησε μια μάλλον απλή ανάλυση του προβλήματος σχετικά με το αν και τότε θα υπάρχει τεχνικά η δυνατότητα να υλοποιηθεί μια παρόμοια «πλήρης» προσομοίωση. Η ανάλυσή του διαπίστωσε στην απλή υπόθεση ότι η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς είναι άλογη του όγκου των δεδομένων (πλήθος νευρωνικών συνάψεων) που πρέπει



Η τελική μορφή μιας πειραματικής νευρο-μηχανικής πλακέτας, κατασκευασμένη στο πλαίσιο του προγράμματος SynAPSE. Στο αριστερό τμήμα διακρίνεται ο προγραμματιζόμενος «νυρήνας» που περιλαμβάνει 256 νευρώνες και 1024 x 256 συνάψεις.



Το Brain Wall είναι ένα σύστημα αναπαράστασης της νευρικής λειτουργίας που αναπτύχθηκε από τους ερευνητές του προγράμματος SynAPSE, το οποίο χρηματοδοτείται από την Υπηρεσία Προηγμένων Αμυντικών Σχεδίων DARPA.

να υποστούν επεξεργασία σε κάθε «κύκλο» λειτουργίας του εγκεφάλου. Επίσης, ανέλυσε την τάση αύξησης της υπολογιστικής ισχύος των υπολογιστών από τη δεκαετία του 50 μέχρι τη δεκαετία του 90 και τον περίφημο νόμο του Moore, ο οποίος διαπιστώνει ότι η ταχύτητά τους διπλασιάζεται κατά μέσο όρο κάθε 18 μήνες, ακολουθώντας την εξέλιξη της τεχνολογίας και τους νέους

τρόπους κατασκευής και βελτίωσης των μικροηλεκτρονικών γενικότερα. Παρότι υπήρξαν και περιόδοι μικρότερου ρυθμού αύξησης, ο νόμος του Moore φαίνεται χονδρικά να ισχύει, μάλιστα δε ο ρυθμός αυτός σταδιακά αυξάνεται, λόγω των ολοένα και πιο αποτελεσματικών τεχνολογιών σχεδίασης και κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων των σύγχρονων μικροεπεξεργαστών. Ακόμα



Σχηματικό διάγραμμα της νευρομορφικής μονάδας που χρησιμοποιείται από τους ερευνητές του προγράμματος BrainScaleS για την προσομοίωση περίπου 200.000 νευρώνων και 49 διακατομμυρίων συνάψεων.

και με τον σταθερό ρυθμό των 18 μηνών, είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς πως, με τα σημερινά δεδομένα, μια αύξηση της ταχύτητας των υπολογιστών της τάξης του 1.000 ($2^{10} = 1.024$) ισοδυναμεί με λιγότερο από δέκα «διπλασιασμούς» Moore, ή αλλιώς περίπου 15 χρόνια, ενώ για αντίστοιχη αύξηση της τάξης του 1.000.000, το χρονικό διάστημα που προκύπτει είναι κάτι λιγότερο από 30 χρόνια. Όμως, λόγω της αύξησης του ρυθμού ανάπτυξης της αντίστοιχης τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες, στην πραγματικότητα ταχύτερα απ' ό τι προβλέπει ο νόμος του Moore, εκτιμάται πως το αντίστοιχο πραγματικό διάστημα που απαιτείται για μια τέτοια θεαματική βελτίωση δεν είναι τρεις δεκαετίες αλλά μόλις 15 χρόνια περίπου. Αυτό σημαίνει πως, καθώς πλησιάζουμε στο 2030, η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς, σε ταχύτητα και μνήμη, για την πλήρη προσομοίωση ενός ανθρώπινου εγκεφάλου, θα είναι διαθέσιμη σε έναν αντίστοιχο τυπικό υπολογιστή γραφείου.

Με βάση τα στοιχεία της εξέλιξης των μικροεπεξεργαστών από τη δεκαετία του 50 μέχρι και σήμερα, γίνεται φανερό πως η βελτίωση της υπολογιστικής ισχύος αυξάνεται με υπερ-εκθετικό ρυθμό, ενώ ταυτόχρονα το απαιτούμενο κόστος απόκτησης και λειτουργίας μειώνεται με αντίστοιχο ραγδαίο ρυθμό. Μέσα σε έξι δεκαετίες, ένας ισχυρός υπολογιστής γραφείου προσφέρει σήμερα επεξεργαστική ισχύ σχεδόν 90 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από έναν «υπερυπολογιστή» του 1957, με χιλιάδες φορές μικρότερο κόστος και κατανάλωση ενέργειας! Σύμφωνα με μελέτες πολλών επιστημόνων, όπως του Hans Moravec, η επεξεργαστική ισχύς που απαιτείται για μια πλήρη προσομοίωση του ανθρώπινου εγκεφάλου αγγίζει τα τουλάχιστον 100 εκατομμύρια MIPS (1 MIPS = 1 εκατομμύριο απλές εντολές προγράμματος το δευτερόλεπτο), δηλαδή ισοδυναμεί με 550-600 φορές ταχύτερη επεξεργασία από εκείνη ενός σύγχρονου ισχυρού υπολογιστή γραφείου. Σύμφωνα με αυτή την εκτίμηση και τον νόμο του Moore περί διπλασιασμού (τουλάχιστον) της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος των μικροεπεξεργαστών κάθε 18 μήνες, το κενό αυτό θα έχει καλυφθεί μέσα σε μια 15ετία - κάτι που συμφωνεί και με άλλες αναλύσεις εκτιμήσεων των επιστημόνων. Όλα δείχνουν πως κάποια στιγμή πριν το 2020, το απαραίτητο υλικό (Hardware) για την προσο-

Η σημερινή τεχνολογία έχει επιτρέψει τη σχεδίαση και την κατασκευή νέων συστημάτων υλικού (hardware) και λογισμικού (software) που προσομοιώνουν με πολύ μεγάλο βαθμό ρεαλισμού τμήματα ενός πραγματικού ανθρώπινου εγκεφάλου. Μερικά από τα σημαντικότερα αυτά ερευνητικά προγράμματα είναι τα ακόλουθα:

DARPA SyNAPSE Program

Το SyNAPSE είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα χρηματοδοτούμενο από την περίφημη Υπηρεσία Προηγμένων Αμυντικών Σχεδίων DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ. Έχει ως βασικό στόχο τη δημιουργία «νευρο-μορφικών» μικροπεριεργαστών οι οποίοι θα είναι συγκρίσιμοι σε υπολογιστικές δυνατότητες, φυσικό μέγεθος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με πραγματικούς εγκεφάλους ζώων. Σε πρώτη φάση η μελέτη περιλαμβάνει εικονική σχεδίαση, προσομοίωση λειτουργίας και θελιτοποίηση των αντίστοιχων νευρωνικών δικτύων σε υπερυπολογιστές, ενώ σε δεύτερη φάση προβλέπεται η κατασκευή τους σε προγραμματιζόμενο υλικό. Οι συσκευές αυτές θα περιλαμβάνουν ένα συγκεκριμένο αριθμό νευρώνων, διασυνδεδεμένων μεταξύ τους και με δυνατότητες «εκπαίδευσης», με πρόθετο πλεονέκτημα ότι η υλοποίηση κατευθύνει σε εξειδικευμένο υλικό (αντί σε λογισμικό ενός τυπικού υπολογιστή) αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα επεξεργασίας και ελαχιστοποιεί το φυσικό μέγεθος και την κατανάλωση ενέργειας. Τον Οκτώβριο του 2011 παρουσιάστηκε το πρώτο πρωτότυπο μιας τέτοιας συσκευής με 258 νευρώνες, ενώ σήμερα κατασκευάζονται ήδη συσκευές με πολλαπλές μονάδες διασυνδεδεμένες μεταξύ τους, ενσωματώνοντας ένα εκατομμύριο νευρώνες και ένα δισεκατομμύριο συνάψεις.

SpINNaker Machine

Το SpINNaker είναι μια «μαζική παράλληλη» νευρο-μορφική αρχιτεκτονική εξειδικευμένου υλικού, που έχει ως στόχο τη βιολογικά ρεαλιστική προσομοίωση πραγματικών νευρωνικών δικτύων μεγάλης κλίμακας.

BrainScaleS Project

Νευρο-μορφικό υλικό βασισμένο σε τυποποιημένη τεχνολο-

γία αναλογικών κυκλωμάτων VLSI. Κάθε κατασκευή περιλαμβάνει περίπου 200.000 νευρώνες και 49 δισεκατομμύρια συνάψεις.

Spaun brain simulation

Δημιούργημα Καναδών ερευνητών, το Spaun είναι ένας βιολογικά ρεαλιστικός προσομοιωτής εγκεφαλικών λειτουργιών περίπου 2,5 εκατομμυρίων νευρώνων. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε, αν και δεν αποτελεί πλήρη προσομοίωση ενός ολόκληρου εγκεφάλου, εν τούτοις μπορεί να εκτελέσει συγκεκριμένες διεργασίες με μεγάλη αποτελεσματικότητα, όπως για παράδειγμα κατανόηση εικόνας και βίντεο.

Blue Brain Project

Το Blue Brain Project αποτελεί μια προσπάθεια προσομοίωσης του ανθρώπινου εγκεφάλου μέσω «αντίστροφης» ανάλυσης της λειτουργίας του (reverse engineering) σε μοριακό επίπεδο. Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 2005 από τον Henry Markram στην Πολυτεχνική σχολή της Λωζάνης στην Ελβετία (EPFL) και βασίστηκε αρχικά σε προσομοιώσεις σε έναν υπερυπολογιστή τύπου Blue Gene (IBM). Μέχρι τον Νοέμβριο του 2011, οι μεγαλύτερες προσομοιώσεις περιελάμβαναν περίπου 1 εκατομμύριο νευρώνες και 1 δισεκατομμύριο συνάψεις.

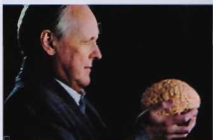
Human Brain Project

Αποτελεί κατά κάποιον τρόπο τη μετεξέλιξη των μοντέλων και της γενικότερης προσέγγισης του Blue Brain Project. Δηλαδή τη λεπτομερή προσομοίωση σε μοριακό επίπεδο των διεργασιών χαμηλού επιπέδου που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό των νευρώνων και των συνάψεων. Το πρόγραμμα έλαβε έγκριση για χρηματοδότηση ύψους 1 δισεκατομμύριο ευρώ από την ΕΕ και στοχεύει μέσα σε 12 χρόνια (περί το 2024-2025) να έχει ολοκληρωθεί πλήρως το εγχείρημα της προσομοίωσης, και επιπλέον να προσφέρει τις βάσεις για την κατανόηση διαφόρων παθολογικών καταστάσεων του εγκεφάλου, καθώς και κάποιων από τις ανώτερες γνωστικές διεργασίες. Επισκευαζόμενος του προγράμματος είναι, και στην περίπτωση αυτή, ο καθηγητής Henry Markram της Πολυτεχνικής σχολής της Λωζάνης στην Ελβετία (EPFL).

μοίωση ενός ανθρώπινου εγκεφάλου στο εικονικό περιβάλλον ενός υπολογιστή θα είναι πλέον τόσο φθινό ώστε θα είναι προσιτό σε κάθε απλό χρήστη, προγραμματιστή ή ερευνητή. Το κύριο ζητούμενο είναι αν μέχρι τότε οι επιστήμονες θα έχουν καταφέρει να αποκωδικοποιήσουν πλήρως τις εσωτερικές διεργασίες που παράγουν το συνολικό αποτέλεσμα, αυτό δηλαδή που ονομάζουμε «νόηση» και «εμφύια» στην ανθρώπινη συμπεριφορά.

Σήμερα ο ταχύτερος υπερυπολογιστής στον κόσμο ανήκει στο Εθνικό

Εργαστήριο του Oak Ridge (ORNL) στις ΗΠΑ και είναι το μοντέλο Cray XK7 Titan. Η ολοκλήρωσή του ανακοινώθηκε στις 29 Οκτωβρίου 2012. Αποτελείται από



18.688 κόμβους, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει έναν πολυπύρρο (16-core) κύριο επεξεργαστή (CPU) και ένα θηθηκτικό επεξεργαστή αριθμητι-

Ο Steve Furber, ένας από τους εξέχοντες ερευνητές στον τομέα της σχεδίασης νευρο-μορφικών αρχιτεκτονικών εξειδικευμένου υλικού και βασικός εμπνευστής του συστήματος SpINNaker (Spiking Neural Network Architecture), πιστεύει πως ανάλογες προσπάθειες θα επιτρέψουν κάποια στιγμή την πλήρη αποκωδικοποίηση ανώτερων γνωστικών διεργασιών του ανθρώπινου εγκεφάλου.



ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

Η ψηφιακή τεχνολογία, η γενικότερη αρχιτεκτονική και ο τρόπος οργάνωσης των σύγχρονων υπολογιστών τους καθιστούν εξαιρετικά αποτελεσματικούς ως εργαλεία για την επεξεργασία δεδομένων και την εκτέλεση αριθμητικών υπολογισμών. Για τον λόγο αυτόν, η μέτρηση της πραγματικής τους ταχύτητας επεξεργασίας βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε δείκτες που σχετίζονται είτε με το πλήθος των αριθμητικών πράξεων (δεκαδικών ή ακεραίων) ανά δευτερόλεπτο, είτε με το πλήθος των απλών εντολών προγράμματος (γλώσσα μηχανής) που εκτελούνται στον ίδιο χρόνο. Δύο από τους πιο διαδεδομένους δείκτες απόδοσης των επεξεργαστών είναι η μετρική «Mflops» (million floating-point operations per second), που αντιστοιχεί στην ταχύτητα επεξεργασίας όσον αφορά πράξεις δεκαδικών, και η μετρική «MIPS» (million instructions per second), που αντιστοιχεί στην ταχύτητα επεξεργασίας σε σχέση με απλές εντολές προγράμματος. Και στις δύο περιπτώσεις, το αρχικό «M» χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την αντίστοιχη τιμή στην τάξη των εκατομμυρίων.

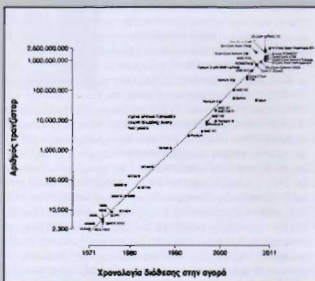
Ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο και τον τρόπο επεξεργασίας, οποιαδήποτε προσομοίωση εγκεφάλου απαιτεί τυπικά την ανάγνωση ή και εγγραφή της τιμής σε κάθε σύνδεση μεταξύ νευρώνων τουλάχιστον μία φορά ανά κύκλο λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι μια πλήρης προσομοίωση 100 δισεκατομμυρίων νευρώνων με 10.000 συνάψεις ο καθένας ισοδυναμεί με τουλάχιστον 1 τετρικός εκατομμύριο (10^9) απλές εντολές προγράμματος σε επίπεδο γλώσσας μηχανής (π.χ. *read/write*).

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ	ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ (MIPS)
UNIVAC I	1951	0,002
Intel 8080	1974	0,330
Intel 80286	1982	2,66
Intel 80386DX	1985	9,9
Intel 80486DX2	1992	54
Intel Pentium (I)	1994	188
Intel Pentium III	1999	2.054
AMD Athlon XP	2003	7.527
Intel Core 2 E X6800	2006	27.079
Intel Core I7 920	2008	82.300
AMD FX-8150	2011	108.890
Intel Core I7 EE 3960X	2011	177.730

κής επεξεργασίας (GPU), με συνολικά 32×6 GB μνήμης. Η συνολική μνήμη του συστήματος φτάνει τα 710 TB κεντρικής μνήμης (1 TB = 10^{12} bytes). Η συνολική ταχύτητα επεξεργασίας του συστήματος εκτιμάται γύρω στα 17.59 Pflops (1 Pflops = 10^{15} flops, 1 flops = πράξη δεκαδικών αριθμών ανά δευτερόλεπτο), δηλαδή αρκεί για την επεξεργασία κάθε byte της διαθέσιμης μνήμης περίπου 24-25 φορές το δευτερόλεπτο. Τουλάχιστον θεωρητικά, ένας υπερυπολογιστής αυτής της κλίμακας ίσως πλησιάζει τις απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ για

την πλήρη προσομοίωση ενός ανθρώπινου εγκεφάλου, υπολείπεται όμως ακόμα κατά τουλάχιστον 5.000 φορές από τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε μνήμη, κάτι που οπωσδήποτε θα υποβάθμιζε τη συνολική του ταχύτητα επεξεργασίας, ακόμα και αν αυτή ήταν διαθέσιμη σήμερα. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, δηλαδή ο συνδυασμός λίγων σχετικά ισχυρών επεξεργαστών γενικής (CPU) και ειδικής (GPU) χρήσης είναι ίσως κατάλληλη για άλλες εφαρμογές, όπως π.χ. για την προσομοίωση πυρηνικών εκρήξεων

Ο πίνακας είναι ενδεικτικός της εξέλιξης των μικροεπεξεργαστών σε υπολογιστή οικιακής χρήσης κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Ο UNIVAC I έχει συμπεριληφθεί απλά και μόνο ως μέτρο σύγκρισης της τεχνολογίας των «υπερυπολογιστών» της εποχής (δεκαετία του 50). Οι επεξεργαστές που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη είναι μερικοί από τους πιο διαδεδομένους την εποχή που κυκλοφόρησαν. Στην τρίτη στήλη αναφέρεται η μέση ονομαστική τους ταχύτητα σε MIPS για την τυπική συχνότητα χρονισμού τους (*clock frequency*), όπως κυκλοφόρησαν τότε στην αγορά.



Διάγραμμα εξέλιξης της διαθέσιμης επεξεργαστικής ισχύος (οριζόντιος τριαντζόρο του μικροεπεξεργαστή) συναρτήσει του χρόνου, από το 1971 μέχρι και πρόσφατα. Το διάγραμμα παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα, συνεπώς ο νόμος του Moore περί διπλασιασμού της επεξεργαστικής ισχύος των εμπορικών διαθέσιμων μικροεπεξεργαστών κάθε 18 μήνες περίπου, απεικονίζεται με την ευθεία διαγώνια γραμμή. Ωστόσο διακρίνεται μια τάση αύξησης του ρυθμού κατά τις τελευταίες δεκαετίες πράγμα που αποδεικνύει ότι η προβλεπόμενη περίοδος διπλασιασμού στον νόμο του Moore συνεχώς συρρικνώνεται (υπερ-εκτετικός ρυθμός αύξησης).

και σωματιδιακών φαινομένων, δεν είναι όμως απόλυτα συμβατή με τη μαζική παράλληλη οργάνωση και λειτουργία ενός πραγματικού εγκεφάλου. Ο συγκεκριμένος υπερυπολογιστής περιλαμβάνει συνολικά 560.640 ανεξάρτητες μονάδες παράλληλης επεξεργασίας («πυρήνες» - cores), δηλαδή λιγότερες κατά τουλάχιστον 1 εκατομμύριο φορές σε σχέση με το πλήθος των νευρώνων σε έναν ανθρώπινο εγκέφαλο, ενώ καταναλώνει περίπου 8,2 MW ενέργειας, όση είναι η μέση κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος περίπου 5.000 κατοικιών στην Αττι-

κή και σχεδόν 1 εκατομμύριο φορές περισσότερη (μαζί με τις εγκαταστάσεις κλιματισμού) από τα μόλις 20-40 W που καταναλώνει ένας μέσος ανθρώπινος εγκέφαλος!

Αξίζει να σημειωθεί πως ολόκληρο το ανθρώπινο γονιδίωμα περιλαμβάνει περίπου 20.000 γονίδια που δεν ξεπερνούν συνολικά σε πληροφοριακό όγκο τα 2,9 δισεκατομμύρια ζεύγη νουκλεοτιδίων, το αντίστοιχο 734 MB (1 base pair = 2 bits), δηλαδή κάτι περισσότερο από ένα ψηφιακό δίσκο (CD) μουσικής. Με βάση το ότι η διαφοροποίηση του DNA μεταξύ διαφορετικών ανθρώπων είναι μικρότερη από 1%, ο παραπάνω όγκος μπορεί θεωρητικά να συμπιεστεί σε λιγότερο από μόλις μερικές δεκάδες MB. Αναλογικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο όγκος πληροφοριών που κωδικοποιεί κάθε σύναψη στους νευρώνες του εγκεφάλου απαιτεί τουλάχιστον 16 bits ή και παραπάνω, η πλήρης «αποθήκευση» ενός εικονικού ανθρώπινου εγκεφάλου θα απαιτούσε τουλάχιστον 2 τετράκις εκατομμύρια bytes (2×10^{15}), δηλαδή περίπου 2.800.000 φορές μεγαλύτερο όγκο δεδομένων σε σχέση με αυτόν του DNA.

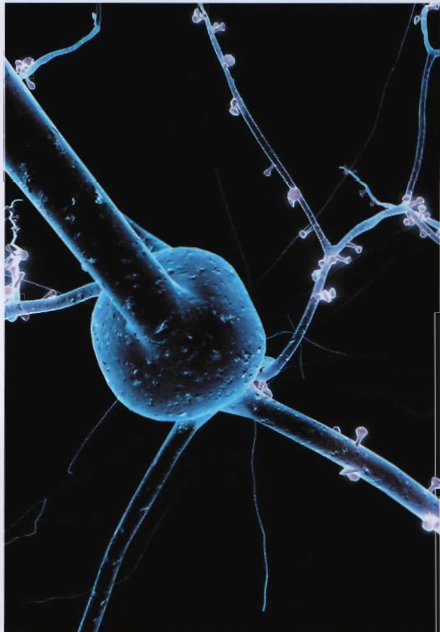
«HUMAN BRAIN PROJECT»: Ο ΠΡΩΤΟΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΣ ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΓΚΕΦΑΛΟΣ

Μεταξύ αρκετών άλλων αντίστοιχων προσπαθειών που ήδη θρίσκονται σε εξέλιξη εδώ και χρόνια, ξεχωρίζει ένα νέο εγχείρημα προσομοίωσης ενός πλήρους ανθρώπινου εγκεφάλου σε βιολογικό επίπεδο. Το Human Brain Project (HBP) αποτελεί την πρώτη ευρωπαϊκή ερευνητική προσπάθεια ανάλογης κλίμακας. Ο προϋπολογισμός, που φθάνει το 1 δισεκατομμύριο ευρώ, εγκρίθηκε μόλις πριν λίγους μήνες και το πρόγραμμα έχει ήδη ξεκινήσει.

Επικεφαλής του προγράμματος είναι ο καθηγητής Henry Markram από την Ελβετία, ο οποίος έχει ασχοληθεί και παλαιότερα με το ίδιο αντικείμενο στο πλαίσιο ενός παρόμοιου προγράμματος, του Blue Brain Project, με την υποστήριξη της τεχνολογίας IBM. Συγκεκριμένα, ο πυρήνας του Blue Brain Project βασίζεται στον υπολογιστή Blue Gene, τεχνολογία που προέρχεται εν μέρει από τον περίφημο υπολογιστή Deep Blue, ο οποίος στη δεκαετία του 90 αποτέλεσε τον πρώτο μη ανθρώπινο αντίπαλο που κατάφερε να νικήσει στο σκάκι τον παγκόσμιο πρωταθλητή Garry Kasparov, τον

σπουδαιότερο ίσως σκακιστή όλων των εποχών. Μέχρι τον Νοέμβριο του 2011, οι μεγαλύτερες προσομοιώσεις νευρωνικών δικτύων στον Blue Gene περιελάμβαναν περίπου 1 εκατομμύριο νευρώνες και 1 δισεκατομμύριο συνάψεις, κάτι αντίστοιχο με τον εγκέφαλο ενός μικρού θηλαστικού. Τον Νοέμβριο του 2012, το σύστημα «True North» των Ερευνητικών

Εργαστηρίων της IBM, σύμφωνα με επίσημη ανακοίνωση της εταιρίας, κατάφερε να προσομοιώσει νευρωνικό δίκτυο με 530 δισεκατομμύρια νευρώνες, όμως τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υπερβολικά απλοποιημένα (μη ρεαλιστικά από βιολογική άποψη). Στο πλαίσιο του Human Brain Project, τα συστήματα αυτά θα πρέπει να αυξηθούν σε κλί-



Οπτική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός μεμονωμένου νευρώνα του συστήματος NEURON μέσω του RTNeuron (3D renderer), όπως αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Blue Brain Project. Αντίστοιχες δυνατότητες τριδιάστατης αναπαράστασης των εσωτερικών διεργασιών ολόκληρου του ανθρώπινου εγκεφάλου αναμένεται να προσφέρει και το Human Brain Project. Η προσομοίωση του ανθρώπινου εγκεφάλου εκτιμάται ότι θα δώσει πολύτιμες πληροφορίες στους ερευνητές για την κατανόηση διαφόρων παθολογικών καταστάσεων, καθώς και κάποιων από τις ανώτερες γνωστικές λειτουργίες.



Από μια άποψη, το Human Brain Project αποτελεί για τις Νευροεπιστήμες και την Τεχνητή Νοημοσύνη ένα επιστημονικό «εγχείρημα ανάλογης κλίμακας και σπουδαιότητας με τον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider - LHC) στο CERN για τη Θεωρητική Φυσική ή το Human Genome Project (HGP) για την πλήρη χαρτογράφηση του ανθρώπινου γονιδιώματος.

μακα και δυνατότητες κατά αρκετές χιλιάδες φορές για μια ρεαλιστική πλήρη προσομοίωση ανθρώπινου εγκεφάλου. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, ο στόχος αυτός φαίνεται δυνατό να υλοποιηθεί μέσα στα επόμενα 12 χρόνια που προβλέπονται για το πρόγραμμα, δηλαδή περίπου το 2025, κάτι που συμφωνεί και με προηγούμενες προβλέψεις ήδη από τη δεκαετία του 90.

Στην ερώτηση γιατί χρειάζεται να δαπανηθούν τόσα χρήματα, ανθρώπινο δυναμικό και ερευνητικό έργο για την προσομοίωση ενός και μόνο «μέσου» ανθρώπινου εγκεφάλου, και μάλιστα μόνο σε βιολογικό επίπεδο (όχι νοητικό), ο Markram αναφέρει χαρακτηριστικά πως μια τέτοια «ρεαλιστική» προσομοίωση του πιο σύνθετου οργάνου του ανθρώπινου σώματος θα βοηθήσει σημαντικά στην κατανόηση των εσωτερικών του λειτουργιών, της αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφόρων περιοχών, καθώς και των σύνθετων βιοχημικών διεργασιών στο εσωτερικό των νευρώνων και των συνάψεων. Από μια άποψη, το Human Brain Project αποτελεί για τις Νευροεπιστήμες



Ενας ερευνητής μελετά στον υπολογιστή το τρισδιάστατο μοντέλο ενός νευρώνα, στο πλαίσιο του προγράμματος Blue Brain Project.

και την Τεχνητή Νοημοσύνη ένα επιστημονικό εγχείρημα ανάλογης κλίμακας και σπουδαιότητας με τον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider - LHC) στο CERN για τη Θεωρητική Φυσική ή το Human Genome Project (HGP) για την πλήρη χαρτογράφηση του ανθρώπινου γονιδιώματος.

Τρεις είναι οι βασικοί στόχοι του Human Brain Project, σύμφωνα με τον Markram. Σε πρώτη φάση, το επίπεδο λεπτομέρειας της προσομοίωσης, δηλαδή η αποτύπωση των εσωτερικών βιοχημικών διεργασιών σε κάθε νευρώνα και σύναψη, θα καταστήσει δυνατή τη μελέτη ανώτερων διεργασιών, όπως η εκμάθηση και η μνήμη, με βάση το πως ακριβώς αυτές λειτουργούν σε χαμηλό επίπεδο. Επιπλέον, η κατανόηση των διεργασιών αυτών με κάθε λεπτομέρεια θα επιτρέψει τη ραγδαία εξέλιξη της επιστήμης σε τομείς όπως η Νευροφυσιολογία και η Ιατρική γενικότερα, καθώς θα προσφέρει τα απαραίτητα εργαλεία και δεδομένα σχετικά με παθολογικές καταστάσεις γνωστικού τύπου, όπως για παράδειγμα οι εκφυλιστικές παθήσεις (π.χ. νόσος Alzheimer, σκλήρυνση κατά πλάκας), οι νευροφυσιολογικές (π.χ. κρίσεις επιληψίας), οι τραυματικές (π.χ. μετεγχειρητικές ή από ατύχημα), κλπ. Τέλος, ένας από τους μακροπρόθεσμους στόχους είναι, όπως πάντα άλλωστε, η πλήρης κατανόηση των ανώτερων νοητικών ικανοτήτων, δηλαδή της ανθρώπινης «έξυπνης» συμπεριφοράς στις διάφορες εκφάνσεις της. Αυτό είναι ίσως και το δυσκολότερο εγχείρημα, καθώς η προσομοίωση των νευρωνικών δικτύων του εγκεφάλου, ακόμα και σε μοριακό επίπεδο, δεν είναι τίποτα θάβαο αν και κατά πόσο μπορεί να οδηγήσει αυτόματα στην κατασκευή μιας πραγματικά «σκε-

πτόμενης μηχανής».

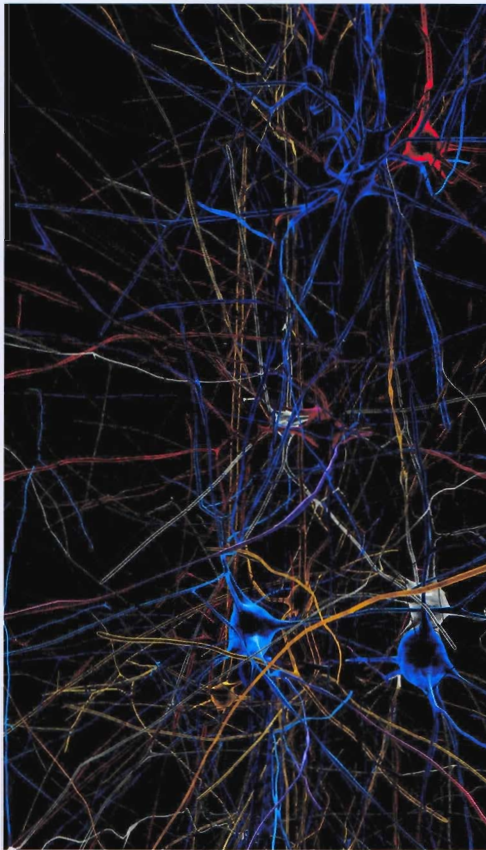
Η ομάδα του Markram ακολουθεί μια δοκιμασμένη μεθοδολογία, αυτή της ιεραρχικής διασύνδεσης πολλών μικρότερων νευρωνικών δικτύων σε μεγαλύτερα, κάτι που φαίνεται να συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με την πραγματική οργάνωση του εγκεφάλου σε συστάδες νευρώνων και περιοχές εξειδικευμένες για συγκεκριμένες διεργασίες και ενέργειες. Παρ' όλα αυτά, παραμένουν αρκετά άλυτα προς το παρόν προβλήματα, όπως για παράδειγμα η πλήρης κατανόηση των μηχανισμών αποθήκευσης και ανάκλησης της μνήμης, καθώς αυτή φαίνεται πως δεν επικεντρώνεται απλά στις συνάψεις μεταξύ μόνο νευρώνων αλλά πραγματοποιείται «καταγεμισμένα» σε πολύ μεγαλύτερες περιοχές του εγκεφάλου. Πρακτικά, αυτό επιτρέπει στον πραγματικό εγκεφαλο να αποθηκεύει αούλλητο όγκο πληροφοριών, διατηρώντας κάθε φορά μόνο τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά π.χ. ενός προσώπου και όχι την πλήρη εικόνα, ενώ επιπλέον η αποθηκευμένη αυτή πληροφορία διασυνδέεται αυτόματα με πλήθος άλλων σχετικών καταχωρίσεων, όπως για παράδειγμα η χροιά της φωνής του συγκεκριμένου προσώπου. Έτσι, οποιαδήποτε πληροφορία συσχετίζεται αμφίδρομα με πολλές άλλες και μάλιστα μπορεί να ανακληθεί ανά πάσα στιγμή μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου, ακόμα και μετά την παρέλευση πολλών ετών. Αυτές οι ιδιαίτερες δυνατότητες του εγκεφάλου, σε συνδυασμό με τη εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και με διάρκεια ζωής σχεδόν δέκα ολόκληρων δεκαετιών συνεχούς λειτουργίας, καθιστούν τον εγκέφαλο ένα πραγματικά αούλλητο βιολογικό επίτευγμα, το οποίο μάλιστα τώρα αρχίζει να προσεγγίζεται επιστημονικά με τέτοια λεπτομέρεια.

Με την έναρξη του 2013, ο πρόεδρος Ομπάμα στις ΗΠΑ ανακοίνωσε πως πρόκειται να ξεκινήσει η αμερικανική «απόπειρα» στο ευρωπαϊκό Human Brain Project, ανεξάρτητα από το SYNAPSE της DARPA που αφορά κυρίως στρατιωτικές εφαρμογές. Το νέο πρόγραμμα έχει την προσωρινή ονομασία Brain Activity Map Project και αναμένεται να εξασφαλίσει προϋπολογισμό τουλάχιστον 3 δισεκατομμυρίων δολαρίων για μία δεκαετία και πλέον. Πρόσφατα πολλές εταιρίες, όπως η Google και η Microsoft, δήλωσαν πως επιθυμούν να συμμετάσχουν σε ένα τέτοιο ερευνητικό πρόγραμμα, προσφέροντας τεχνογνωσία σε επίπεδο ανάπτυ-

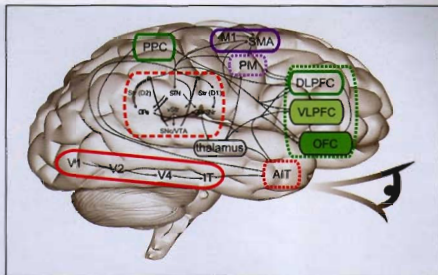
ξης λογισμικού αλλά και σε ό,τι αφορά τις τεράστιες απαιτήσεις σε εξοπλισμό.

Ένα από τα δυσκολότερα τεχνικά προβλήματα που οι επιστήμονες του Human Brain Project καλούνται να επιλύσουν είναι η κατανάλωση ενέργειας ενός τέτοιου «εικονικού» εγκεφάλου. Εκτιμάται πως στην τελική του μορφή το σύστημα ίσως χρειάζεται τόση ενέργεια όση παράγεται από ένα μικρό πυρηνικό σταθμό, ενώ ένα εξίσου σημαντικό ζήτημα είναι οι τεχνικές ψύξης και συντήρησης ενός τόσο μεγάλου συστήματος. Επιπλέον, ακριβώς λόγω της ανυπερέλητης (προς το παρόν) πολυπλοκότητας του ανθρώπινου εγκεφάλου, το εγχείρημα του Human Brain Project δέχεται αρκετή κριτική, ακόμα και εντός των κύκλων των επιστημόνων που εργάζονται στον τομέα αυτό σε παρόμοια προγράμματα.

Σχετικά πρόσφατα (2009), ο Dharmendra Modha, εξέχων ερευνητής στην IBM, ανακάλυψε πως κατάφερε να κατασκευάσει έναν πλήρη εγκέφαλο γάτας σε υπολογιστή, ενώ δύο χρόνια ωρίτερα είχε πετύχει το ίδιο με έναν πλήρη εγκέφαλο ποντικού. Πολλοί ερευνητές, μεταξύ των οποίων και ο Markram, είχαν τότε αντιδράσει έντονα, λέγοντας πως η απλή προσομοίωση μερικών εκατοντάδων χιλιάδων ή και εκατομμυρίων νευρώνων σε έναν υπολογιστή δεν καθιστά αυτόματα το κατασκευάσμα αυτό έναν πλήρη λειτουργικό «εγκέφαλο». Το εγχείρημα αυτό, όμως, αν και είναι απόλυτα σωστό, ισχύει πολύ περισσότερο για φυλόδοξα εγχειρήματα όπως το Human Brain Project, καθώς όσο αυξάνεται το μέγεθος και η κλίμακα των αντίστοιχων νευρωνικών δικτύων, τόσο δυσκολότερο είναι να μοντελοποιηθεί πλήρως η συνδυαστική τους λειτουργία και (πολύ περισσότερο) να κατανοηθούν πλήρως οι νωητικές διεργασίες ανώτερου επιπέδου που παράγουν. Με λίγα λόγια, ένας τέτοιος «τεχνητός εγκέφαλος» φαίνεται να λειτουργεί σε βιοχημικό επίπεδο όπως ένας πραγματικός, όμως δεν διαφέρει σε τίποτα από έναν εγκέφαλο σε κωματώδη κατάσταση, δηλαδή με ελάχιστη ή καθόλου νωητική λειτουργία. Η μεγάλη πρόκληση, όπως παραδέχονται όλοι οι επιστήμονες του χώρου, είναι η μελέτη και η ανακάλυψη ακριβώς των λεπτών, αλλά εξαιρετικά καθοριστικών διαφορών μεταξύ ενός «αδρανούς» και ενός «σπεκτιόμενου» εγκεφάλου.



Προσομοίωση νευρωνικού δικτύου στο οποίο απεικονίζονται σε τρισδιάστατη μορφή τα επιμέρους νευρικά κύτταρα.



Το *Sprun* είναι ένας βιολογικά ρεαλιστικός προσομοιωτής εγκεφαλικών λειτουργιών περίπου 2,5 εκατομμυρίων νευρώνων.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Είναι φανερό πως οι δυνατότητες των ταχύτερων σύγχρονων υπερπολυλογιστών πλησιάζουν ήδη τις εκτιμημένες σχετικά με τις προδιαγραφές για την πλήρη προσομοίωση ενός ανθρώπινου εγκεφάλου. Παρ' όλα αυτά, όπως είχε επισημάνει ο Moravec στη μελέτη του το 1997, οι ταχύτεροι κάθε φορά υπερπολυλογιστές είναι τόσο δαπανηροί σε κόστος κατασκευής και έξοδα λειτουργίας ώστε χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε στρατιωτικές εφαρμογές, ενώ μόλις ένα ελάχιστο ποσοστό της αντίστοιχης ισχύος τους μεταφράζεται σε εφαρμοσμένη έρευνα πάνω σε θέματα Τεχνητής Νοημοσύνης και νευροφυσιολογίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Συνεπώς, η προθεσμία της μίας περίπου δεκαετίας από σήμερα παραμένει ως ρεαλιστικό όραση για ένα τέτοιο εγχείρημα. Το πιο σημαντικό, όμως, πρόβλημα παραμένει η κατανόηση της ίδιας της φύσης και του τρόπου λειτουργίας του εγκεφάλου. Δεν αρκεί η δυνατότητα προσομοίωσης όσον αφορά τις τεχνικές προδιαγραφές – η κύρια δυσκολία έγκειται στον τρόπο οργάνωσης των νευρωνικών δικτύων στο ζωοτικό με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσομοιώνουν όχι μόνο τη βιολογική αλλά κυρίως τη λειτουργική συμπεριφορά των νευρώνων και κατ' επέκταση των ανώτερων νωτικών λειτουργιών, όπως η όραση, η ακοή, η ομιλία, η αφαιρετική σκέψη, κλπ.

Φιλόδοξα ερευνητικά προγράμματα

με τεράστιο προϋπολογισμό, όπως το Human Brain Project και το αντίστοιχο Brain Activity Map Project που πρόκειται να ξεκινήσει στις ΗΠΑ, αποτελούν πόλο έλξης των κορυφαίων ερευνητών από διάφορους κλάδους, όπως την Πληροφορική, τη Μικροηλεκτρονική και τις Νευροεπιστήμες. Προσελκύουν επίσης, εκτός από επιστήμονες και ερευνητικά ιδρύματα, ακόμα και τις πιο μεγάλες εταιρείες του χώρου της Πληροφορικής και των Επικοινωνιών. Πρόκειται για έναν αγώνα δρόμου σε επίπεδο έρευνας μεταξύ των κρατών που θέλουν και μπορούν να συμβάλουν στην αποκρυπτογράφηση των μυστικών του ανθρώπινου εγκεφάλου, που μόλις τώρα έχει ξεκινήσει.

Στην ερώτηση «γιατί τώρα», όλοι σχεδόν οι επιστήμονες απαντούν πως μόνο σήμερα φαίνεται να υπάρχει ρεαλιστικά η δυνατότητα να πραγματοποιήσουν ένα τέτοιο φιλόδοξο εγχείρημα. Ανεξάρτητα από το τελικό αποτέλεσμα, αν δηλαδή ο «εικονικός» ανθρώπινος εγκέφαλος θα είναι «σkeptόμενος» ή απλά «εν λειτουργία», η όλη προσπάθεια θα αποφέρει τεράστια κέρδη σε επιστημονικό επίπεδο. Τελικά, στο βασικό ερώτημα του «γιατί», δηλαδή ποια είναι η σκοπιμότητα του εγχευρήματος, κανείς επιστήμονας δεν μπορεί να αρνηθεί κατηγορηματικά πως αυτό έχει σχέση και με τη φιλοσοφική διάσταση του ζητήματος, τη διαρκή αυτο-διερευνητική σύγκριση του ανθρώπου με τη μηχανή, του δημιουργού με το δημιούργημα. ■

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) Tamara Cohen: SCIENTISTS TO BUILD 'HUMAN BRAIN': SUPERCOMPUTER WILL SIMULATE THE ENTIRE MIND AND WILL HELP FIGHT AGAINST BRAIN DISEASES, Daily Mail (UK), 26 Dec 2012, <http://www.dailymail.co.uk>
- (2) Artificial Brains (portal): THE QUEST TO BUILD SENTIENT MACHINES, 26 Dec 2012, <http://www.artificialbrains.com>
- (3) Barry Neil: SCIENTISTS TO SIMULATE HUMAN BRAIN INSIDE A SUPERCOMPUTER, 12 Oct 2012, CNN.com
- (4) Steve Furger: LOW-POWER CHIPS TO MODEL A BILLION NEURONS, IEEE Spectrum, Aug 2012, <http://spectrum.ieee.org>
- (5) APT Research Group: APT ADVANCED PROCESSOR TECHNOLOGIES RESEARCH GROUP – Spinnaker Project, 25 Dec 2012, <http://apt.cs.man.ac.uk>
- (6) Gary Marcus: THE BRAIN IN THE MACHINE, 20 Nov 2012, <http://www.newyorker.com>
- (7) Mike James: IBM'S TRUENORTH SIMULATES 530 BILLION NEURONS, 23 Nov 2012, IBM Research Labs.
- (8) EPFL Central: THE BLUE BRAIN PROJECT – IN BRIEF, 25 Dec 2012, <http://bluebrain.epfl.ch>
- (9) EPFL Central: THE BLUE BRAIN PROJECT – WHAT DO WE SIMULATE?, 25 Dec 2012, <http://bluebrain.epfl.ch>
- (10) Sally Adee: THE CAT BRAIN CLIFF NOTES, IEEE Spectrum, 26 Nov 2009, <http://spectrum.ieee.org>
- (11) Sebastian Seung: ANOTHER PERSPECTIVE ON MASSIVE BRAIN SIMULATIONS, Scientific American, 11 Jun 2012, <http://www.scientificamerican.com>
- (12) Artificial Brains (portal): DARPA SYNAPSE PROGRAM, 10 Sep 2012, <http://artificialbrains.com/darpa-synapse-program>
- (13) Rebecca Boyle: MEET SPALIN – THE MOST COMPLEX SIMULATED BRAIN EVER, Popular Science, 29 Nov 2012, <http://www.popscl.com>
- (14) Artificial Brains (portal): BRAINSCALES – NEUROMORPHIC PROCESSORS, 14 Aug 2012, <http://artificialbrains.com/brainscales>
- (15) HBP Central: HUMAN BRAIN PROJECT (OVERVIEW), 26 Dec 2012, <http://www.humanbrainproject.eu>
- (16) WHY WE ARE BUILDING A BILLION EUROS MODEL OF A HUMAN BRAIN (INTERVIEW WITH HENRY MARKRAM), New Scientist, 19 Feb 2013, <http://www.newscientist.com>
- (17) Hans Moravec: WHEN WILL COMPUTER HARDWARE MATCH THE HUMAN BRAIN?, Journal of Transhumanism, Vol. 1, 1998, 18 Feb 2013, <http://en.wikipedia.org>
- (18) Wikipedia (article), HUMAN BRAIN, 19 Feb 2013, <http://en.wikipedia.org>
- (19) D. J. Goldhaber-Gordon, et al.: OVERVIEW OF NANO-ELECTRONIC DEVICES, Proceedings of the IEEE, April 1997.
- (20) Hans Moravec: ROBOT, BEING: MERE MACHINE TO TRANSCENDENT MIND, Oxford University Press, 1998.

ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΣΤΕΣ

ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

ΔΩΡΟ ΕΠΙΤΑΓΗ **6€**
+ Δωρεάν ταχυδρομικά για τις αγορές σας! (σελ. 7)



Προσομοιώνοντας τον ανθρώπινο εγκέφαλο

Πώς λειτουργεί η πιο πολύπλοκη μηχανή στο σύμπαν.



Ακραία καιρικά φαινόμενα

Όταν η Φύση εκδικείται...

Κυπριακές Κεραίες

Το GPS των κυπάρων

Πρεόνια

Η έσχατη υποδιαίρεση της ύλης;

Η επίδραση του ονόματος στη ζωή μας

Κινεζική Αστρονομία

Μια παράδοση 42 αιώνων

