

Η ασαφής (fuzzy) λογική στην Κλινική Ιατρική

1. Εισαγωγή
2. Η έννοια της ασάφειας στο φυσικό κόσμο
3. Στην καρδιά της ασαφούς λογικής κρύβεται η ερώτηση:
Τι είναι ένα σύνολο;
4. Η γέννηση της ασαφούς λογικής
5. Συστήματα ασαφούς λογικής
6. Ασαφείς κανόνες, σαφείς αποφάσεις.
Ασαφοποίηση (fuzzifying)
και αποασαφοποίηση (defuzzifying)
7. Αποασαφοποίηση των συνόλων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος *ασαφής λογική*, με τον οποίο μεταφράζουμε τον όρο *fuzzy logic*, του Zadeh, δεν αναφέρεται σε αυτή καθ' αυτή τη λογική. Δεν είναι, δηλαδή, η λογική μεθοδολογία που περιγράφεται ως ασαφής. Ασαφής είναι ο κόσμος μας, τον οποίο και προσπαθεί να περιγράψει. Ίσως, ο όρος *πολυδύναμη λογική* να ανταποκρίνεται καλύτερα στο περιεχόμενο της ασαφούς λογικής, με την έννοια ότι δεν περιγράφει μόνο καταστάσεις διχοτομικές, που μπορούν να πάρουν δύο μόνο τιμές: Ναι ή Όχι, 1 ή 0, που σε μεγάλο μέρος είναι μάλλον τεχνητές ή έξω από την καθημερινή κλινική πράξη, αλλά μπορεί να πάρει πολλές τιμές.

Ζούμε σε έναν κόσμο όχι μόνο αβέβαιο, αλλά και πολύπλοκο. Η διαπίστωση αυτή είναι εμφανής στην καθημερινή κλινική πράξη. Τα βιολογικά συστήματα (και ο άρρωστος ως τέτοιο) χαρακτηρίζονται από εξαιρετική πολυπλοκότητα, «η οποία είναι τάξεως μεγέθους πολύπλοκων άψυχων συστημάτων, που έχει δημιουργήσει ή περιγράψει ο άνθρωπος», όπως αναφέρει ο δημιουργός της ασαφούς λογικής Zadeh.¹

Ο εγκέφαλος είναι ένα πολύπλοκο σύστημα. Η εξέλιξη της νόσου είναι, επίσης, ένα πολύπλοκο σύστημα.

Ε. Ανευληθής

Κωνσταντοπούλειο ΓΠΝΝ «Η Αγία Όλγα»,
Ν. Ιωνία

Fuzzy logic in Clinical Medicine

Abstract at the end of the article

Λέξεις ευρετηρίου

Αβεβαιότητα
Αποασαφοποίηση
Ασαφές σύνολο
Ασαφής λογική
Ασαφοποίηση
Λογική

Αυτή καθ' αυτή η Κλινική Ιατρική, αντιμετωπίζοντας τον άρρωστο (το πολυπλοκότερο βιολογικό –και όχι μόνο– σύστημα), χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα και η άσκηση της, όπως έγινε φανερό από την προηγούμενη συζήτηση, είναι εμποτισμένη «μέχρι μυελού οστέων» από αβεβαιότητα.

Ο Lofti Zadeh, από το 1964, προέβλεψε ότι η κλινική διάγνωση θα αποτελούσε το πιθανότερο πρακτικό πεδίο, όπου θα εφαρμοζόταν η θεωρία του.¹ Εντούτοις, μέχρι σήμερα, η εφαρμογή της ασαφούς λογικής σε μια διαδικασία, η οποία φαίνεται να πληροί όλα τα στοιχεία για την εφαρμογή μιας θεωρίας της διαβάθμισης, όπως συμβαίνει στην Κλινική Ιατρική, δεν έχει τύχει της προσοχής που της αξίζει και της εκμετάλλευσης της βοήθειας, την οποία μπορεί να προσφέρει στον προσδιορισμό και την επίλυση κλινικών προβλημάτων.

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος, χειριζόμενος τις πληροφορίες που του επιτρέπουν να κατανοεί το περιβάλλον του, είναι προικισμένος με τη δυνατότητα ή ιδιότητα της απροσεξίας. Μια ιδιότητα, η οποία δεν είναι εύκολα προσπελάσιμη με την τυπική, μαθηματική (formal) ανάλυση.

Τα βιολογικά μεγέθη δεν έχουν απόλυτο όριο ακριβείας και η αριθμητικοποίηση ποιοτικών παραμέτρων, όσο κι αν είναι αναγκαία, είναι αυθαίρετη και εν πολλοίς

πλασματική. Για παράδειγμα, αρτηριακή πίεση 70 mmHg θεωρείται και χαρακτηρίζεται ως χαμηλή. Αν αυτή αυξηθεί κατά 1 mmHg και πάλι εξακολουθεί να ορίζεται ως χαμηλή, παρόλο που έχει αυξηθεί κατά μία μονάδα, δεδομένου ότι αυτή η μεταβολή δεν εκφράζεται σε κλινικό επίπεδο. Το ίδιο, θεωρητικά και από την άποψη της καθαρής επαγωγής, θα ισχύει και για αρτηριακή πίεση που θα είναι άνω των 70 mmHg. Ο μαθηματικός Wang καταγράφει το ακόλουθο παράδοξο: Αν ο αριθμός x είναι μικρός, τότε ο αριθμός $x+1$ είναι επίσης μικρός. Αν ο $x+1$ είναι μικρός, τότε και ο αριθμός $(x+1)+1$ είναι επίσης μικρός και ούτω καθεξής επ' άπειρον. Προφανώς, αυτό και άλλα παράδοξα έχουν τη ρίζα τους στον ελληνικό φιλόσοφο Ζήνωνα,^{2,3} ο οποίος πρώτος προκάλεσε την κοινή λογική με τα γνωστά παράδοξά του. Σε ένα από αυτά, σχετικό με την έννοια της ασαφούς λογικής, θέτει το ερώτημα: αν αφαιρέσει κανείς έναν κόκκο άμμου από ένα σωρό άμμου, ο σωρός εξακολουθεί να παραμένει σωρός; Και αν αφαιρέσει και δεύτερο και τρίτο κ.ο.κ., παραμένει σωρός; Και πότε παύει να είναι σωρός;

Τα προηγούμενα παράδοξα καθιστούν εμφανή την ασαφή φύση του πραγματικού κόσμου και τη δυσκολία να χαραχθεί μια διαχωριστική γραμμή που να ορίζει απολύτως το φυσιολογικό από το παθολογικό. Πότε ο σωρός της άμμου διέρχεται τη διαχωριστική γραμμή και καθίσταται μη σωρός; Πότε, για να έλθουμε στην ιατρική πράξη, η υπερτροφία του προστάτη, που αρχίζει από την πρώιμη μέση ηλικία, διασχίζει τη διαχωριστική γραμμή και καθίσταται παθολογικά διογκωμένος προστάτης;

2. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΣΑΦΕΙΑΣ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΚΟΣΜΟ

Η βεβαιότητα και η σαφήνεια των μαθηματικών δεν αποτελεί συστατικό στοιχείο της ανθρώπινης φύσης και της Κλινικής Ιατρικής ως επιστήμης, που αντικείμενό της έχει τον πάσχοντα άνθρωπο. Ο κόσμος της καθημερινής πραγματικότητας δεν είναι ακριβής ούτε σαφής. Η κλασική λογική που χρησιμοποιεί δύο μόνο τιμές: ναι-όχι, 0-1 (δικοτομική), θυσιάζει την ακρίβεια προς όφελος της σαφήνειας. Χρησιμοποιεί μόνο δύο τιμές, για να απαντήσει στις επιστημονικές ερωτήσεις. Αληθές ή ψευδές, ναι ή όχι, 0 ή 1.

Εντούτοις, ο πραγματικός κόσμος είναι ασαφής και όποτε προσπαθούμε να μετρήσουμε κάποια πράγματα με ακρίβεια, αδυνατούμε να μετρήσουμε κάποια άλλα με την ίδια ακρίβεια. Αυτή την κατάσταση προσδιορίζει η αρχή της απροσδιοριστίας του Haisenberg.⁴ Στη συνέχεια, ο πολωνός Lukasiwicz* εξέφρασε την απροσδιο-

ριστία ως ένα «συνεχές» μεταξύ των ακραίων τιμών αληθές-ψευδές, καθιστώντας την περιγραφή του πραγματικού κόσμου ζήτημα βαθμού προσέγγισης της αλήθειας και του ψεύδους. Έτσι, μεταξύ των ακραίων τιμών αληθές-ψευδές, ναι-όχι, υφίσταται φάσμα τιμών, οι οποίες και περιγράφουν τον πραγματικό κόσμο και συνιστούν την έννοια της πολυδύναμης ή ασαφούς λογικής. Η ασαφής λογική είναι αναλογική αντί να είναι διχοτομική, πολύτιμη (παίρνει πολλές τιμές) αντί να είναι δίτιμη, πολυσθενής αντί δισθενής.

Η αρχή της ασαφούς λογικής συμπυκνώνεται στη διαπίστωση ότι τα πάντα στον πραγματικό κόσμο είναι ζήτημα βαθμού. Στον πραγματικό κόσμο, μεταξύ του άσπρου-μαύρου (που εμφανίζεται σε ακραίες καταστάσεις και σαφώς ορισμένες, εν μέρει τεχνητά και αυθαίρετα) επικρατεί, κυριαρχεί το γκριζό σε όλες του τις αποχρώσεις, από το πιο ανοικτό, που προσεγγίζει το άσπρο (αλήθεια), μέχρι το πιο σκούρο, που προσεγγίζει το μαύρο (ψεύδος). Στην περιοχή αυτή του γκριζού κινείται ο πραγματικός κόσμος και η Κλινική Ιατρική και οι τόνοι της μπορούν να εκφραστούν καλύτερα με την πολυδύναμη λογική.

3. ΣΤΗΝ ΚΑΡΔΙΑ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΡΥΒΕΤΑΙ Η ΕΡΩΤΗΣΗ: ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΝΑ ΣΥΝΟΛΟ;

Η κατηγοριοποίηση, από την εποχή του Αριστοτέλη, διαπερνά τη σκέψη μας καθημερινά. Ίσως, παραφράζοντας το γνωστό ορισμό του, θα μπορούσε κανείς να πει ότι ο άνθρωπος είναι ζώο ταξινομητικό. Ο κύριος ρόλος του νεοφλοιού, της φαιάς ουσίας του εγκεφάλου μας, της λογικής μας δηλαδή σκέψης, είναι ταξινομητικός. Συνίσταται, δηλαδή, στο χειρισμό συνόλων, τάξεων, κατηγοριών.⁵

Η ταξινόμηση καθίσταται δυνατή διά της δημιουργίας κατηγοριών, οι οποίες γενικεύουν και απλοποιούν, αμβλύνοντας τις ατομικές ιδιαιτερότητες (χωρίς να τις εξαφανίζουν) και τονίζοντας τα κοινά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, όταν λέμε λοιμώδη νοσήματα, εννοούμε σύνολο νοσημάτων (και όχι ένα συγκεκριμένο λοιμώδες νόσημα), των οποίων το κοινό χαρακτηριστικό, πέραν των άλλων, είναι η δυνατότητα μετάδοσης (με οποιοδήποτε τρόπο) και διασποράς τους σε μεγαλύτερο πληθυσμό ατόμων. Όλα τα νοσήματα που κατηγοριοποιούνται στο σύνολο, τάξη, κατηγορία «λοιμώδη νοσήματα», έχουν το προαναφερθέν κοινό χαρακτηριστικό, ενώ τα επιμέρους νοσήματα, που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία, κατατάσσονται βάσει του κοινού χαρακτηριστικού τους στη δεδομένη κατηγορία, αλλά έχουν τα ιδιαίτερα τους χαρακτηριστικά. Π.χ., η φυμα-

* Jan Lukasiwicz (1878–1955), πολωνός φιλόσοφος, που δίδαξε στο Πανεπιστήμιο της Βαρσοβίας.

τίωση είναι λοιμώδεις (μεταδοτικό) νόσημα, διότι έχει κοινό χαρακτηριστικό με άλλα παρόμοια νοσήματα τη μεταδοτικότητα, αλλά έχει και τα ιδιαίτερα της κλινικοεργαστηριακά χαρακτηριστικά, που τη διαφοροποιούν από άλλα μεταδοτικά και λοιπά νοσήματα.

Στη θεωρία των συνόλων, που πρώτος διατύπωσε ο Cantor,⁶ η ασάφεια εξοβελίζεται και δεν υπάρχουν γκρίζες περιοχές. Η εφαρμογή μιας διαχωριστικής γραμμής (επιλεγμένης αυθαίρετα αλλά όχι ετσιθελικά) καθιστά τη διάκριση εμφανή. Εντούτοις, παρόλο που η θεωρία των συνόλων του Cantor είναι βολική και σύμφωνη με την καθημερινή αυθαιρεσία της αντίληψης στο να αγνοεί τις περιοχές του γκρίζου, δεν καταργεί το πρόβλημα της ασάφειας των ορίων. Όπως καταγράφεται από το μαθηματικό Charles Dodgson, ο γνωστός Lewis Carroll από το έργο του «η Αλίκη στη χώρα των θαυμάτων», ο οποίος συνέλαβε τα θεωρητικά προβλήματα που εγείρει η θεωρία των συνόλων, αναφέρει: «τράβα απλώς μια γραμμή και κάνε σαν να είναι έτσι». Η διαχωριστική γραμμή καταργεί την ασάφεια με τίμημα την ακρίβεια και κέρδος τη βολικότητα και το εύχρηστο.

Εντούτοις, η ενασχόληση των λογικών και των επισημολόγων με την ασάφεια οδήγησε στη διαπίστωση ότι δεν πρόκειται περί μιας οριακής διαταραχής αμελητέας, αλλά περί πανταχού παρούσας κυριαρχίας στον πραγματικό κόσμο.

Ο πρώτος που ασχολήθηκε σοβαρά με την έννοια της ασάφειας ήταν ο αμερικανός φιλόσοφος Sanders Pierce, ο οποίος ειρωνευόταν τη λογική του διαχωρισμού «εριφίων και αμνών», που διαχωρίζει την πραγματικότητα σε «άσπρο-μαύρο», «αληθές και ψευδές», καταργώντας ή αγνοώντας το συνεχές των μεγεθών και των καταστάσεων που κυβερνά και χαρακτηρίζει τη γνώση και τις πραγματικές καταστάσεις του κόσμου μας.

Ο χρόνος είναι ένα συνεχές μέγεθος, η ταχύτητα, το βάρος και άλλα φυσικά μεγέθη έχουν συνέχεια και δεν είναι απόλυτα διακριτά. Εμείς τέμνουμε αυτό το συνεχές αυθαίρετα και για πρακτικούς λόγους, θυσιάζοντας την ακρίβεια στη βολικότητα.

Αλλά εκτός της Φυσικής, και στην Κλινική Ιατρική τα μεγέθη είναι συνεχή. Το επίπεδο της συνείδησης είναι ένα συνεχές, από την πλήρη συνείδηση μέχρι το κώμα, η έννοια της αρρώστιας είναι, επίσης, συνεχής, από την προκλινική της έκφραση μέχρι την πλήρη εκδήλωσή της, με όλη τη συμπτωματολογία και ενδιάμεσες καταστάσεις που μεταπίπτουν η μια στην άλλη χωρίς σαφή όρια. Η ασάφεια, με την έννοια που περιγράφεται εδώ και όχι ως αστόχαστη διατύπωση αμχανιάς ή διανοητικής τεμπελιάς, είναι χαρακτηριστικό της πραγματικότητας του κόσμου μας, ανήκει στην πυρηνική δομή του και τα θε-

μέλιά του και δεν είναι ατέλεια της αντίληψής μας. Η ασάφεια, σημειώνει ο Pierce, «δεν μπορεί να εξαλειφθεί στον κόσμο της λογικής, όπως δεν μπορεί να εξαλειφθεί η τριβή στη μηχανική».⁸

Ο Bernard Russell επίσης, διατύπωσε τη θέση ότι η ασάφεια «είναι σαφώς ζήτημα διαβάθμισης».⁹ Μια σταγόνα νερό είναι ασαφέστερη όταν τη βλέπουμε με γυμνό μάτι από ό,τι στο μικροσκόπιο. Μια «κουνημένη» φωτογραφία είναι πιο ασαφής από μια κανονική. Αλλά πέραν αυτού, ακόμη και το μέτρο, ένα όργανο ακριβούς μέτρησης, στην ουσία είναι ασαφές. Μετρά την απόσταση μεταξύ δύο σημείων, τα οποία όμως έχουν διαστάσεις, είναι μικροσκοπικά τμήματα κάποιου πάχους. Έτσι, η μετρούμενη απόσταση μεταξύ τους δεν είναι απολύτως διακριτή και σαφής. Εκτός αυτού, και το ίδιο το μέτρο μεταβάλλει μέγεθος, συστέλλεται και διαστέλλεται, ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Η παγκοσμιότητα και πανταχού παρουσία της ασάφειας διατυπώθηκε από τον Einstein με την απόφαση ότι «στο μέτρο που οι νόμοι των μαθηματικών αναφέρονται στην πραγματικότητα, δεν είναι σαφείς (βέβαιοι) και στο μέτρο που είναι βέβαιοι, δεν αναφέρονται στην πραγματικότητα».¹⁰

4. Η ΓΕΝΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Ο Jan Lukasiewicz υπήρξε ο πρώτος που συστηματοποίησε την έννοια της ασαφούς λογικής, διατυπώνοντας μια πρώιμη ιδέα ασαφών συνόλων, στα οποία, εκτός των δύο τιμών της κλασικής λογικής (αληθές-ψευδές), προσέθεσε και την κατά ήμισυ αληθή και κατά ήμισυ ψευδή τιμή. Δηλαδή, εκτός των τιμών 0 και 1 (ψευδές-αληθές, είναι-δεν είναι) της κλασικής λογικής, προσέθεσε και μια ενδιάμεση τιμή «είναι κατά το ήμισυ-δεν είναι κατά το ήμισυ», η οποία είναι ταυτόχρονα αληθής (είναι και δεν είναι), χωρίς να δημιουργεί αντίφαση.

Για παράδειγμα, ένα ποτήρι νερό μπορεί να είναι μισογεμάτο και μισοάδειο ταυτόχρονα. Από τη στιγμή που διαπιστώθηκε ότι δεν αίρεται η αρχή της αντίφασης, με την εμφάνιση και τρίτης τιμής μεταξύ 0 και 1, άνοιξε ο δρόμος για τη δυνατότητα πολλών, άπειρων τιμών μεταξύ των δύο απόλυτων άκρων, που κατέστησε δυνατή στη συνέχεια την περιγραφή της πολυδύναμης ασαφούς λογικής. Η «νέα» λογική δεν εκθρονίζει την κλασική λογική. Αντίθετα, τη διευρύνει, καθιστώντας την ακριβέστερη. Δίνοντας τη δυνατότητα προσθήκης άπειρων τιμών μεταξύ του 0 και 1 της κλασικής λογικής, επιτρέπει τη βαθμοποίηση της αλήθειας, η οποία έτσι κι αλλιώς ποτέ δεν ήταν απόλυτη.

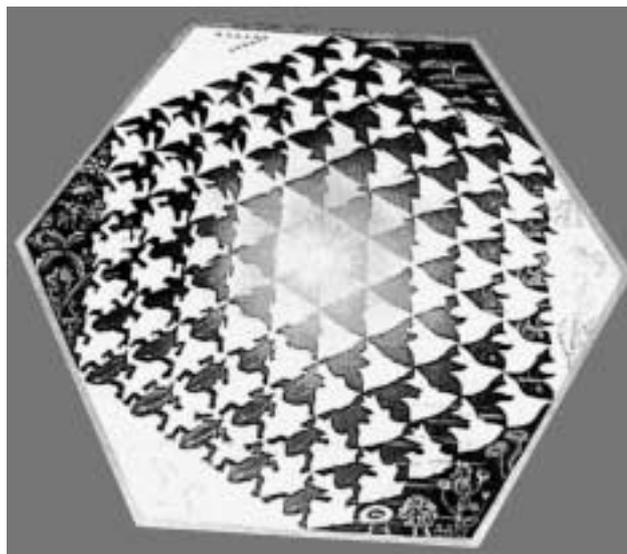
Έτσι, είναι φανερό ότι και η αρρώστια είναι θέμα βαθμού και όχι απόλυτο μέγεθος, με την έννοια ότι ένας

άρρωστος δεν είναι απολύτως είτε άρρωστος είτε υγιής, αλλά εν μέρει άρρωστος και εν μέρει υγιής. Ο διαβητικός είναι σε ένα βαθμό πάσχων, αλλά, και ταυτόχρονα, σε ένα βαθμό υγιής. Η μεταβολή στην κλίμακα υγιής-πάσχων παίρνει πολλές τιμές και η θέση του διαβητικού σε αυτή την κλίμακα είναι συνάρτηση του χρόνου κατά τον οποίο πάσχει, των επιπλοκών της νόσου, αλλά και του κατά πόσο και σε ποιο βαθμό η νόσος του παρεμβαίνει στην ποιότητα της ζωής του, όπως αυτός την αντιλαμβάνεται. Έτσι, για παράδειγμα, ένας διαβητικός 60 ετών με διαβήτη τύπου II πρωτοανακαλυφθέντα σε αυτή την ηλικία και ρυθμιζόμενος με δίαιτα, είναι άρρωστος σε μικρότερο βαθμό από ένα διαβητικό τύπου I, ο οποίος δεν ρυθμίζεται επαρκώς με ινσουλίνη, ή, αντίστοιχα, ο πρώτος είναι υγιέστερος του δεύτερου. Αν εκφράσουμε αριθμητικά το παραπάνω παράδειγμα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι αν ο πρώτος είναι άρρωστος 0,10 (10%), είναι και υγιής 0,90 (0,90%) και, αντίστοιχα, αν ο δεύτερος είναι άρρωστος 0,70 (70%), είναι και υγιής 0,30 (30%). Έτσι, αν ναι (άρρωστος) είναι μερική αλήθεια (10%), τότε όχι (δεν είναι άρρωστος) είναι η συμπληρωματική άρνηση (το υπόλοιπο) που απαιτείται για να γίνει η αλήθεια 1 και ορίζεται ως 90%.

Όσοι είναι εξοικειωμένοι με τη ζωγραφική του Escher,* θα έχουν ένα κατ' αναλογία παράδειγμα της ασαφούς λογικής και της βαθμοποίησης που αυτή εκφράζει. Στην εικόνα του Escher, μικρές μεταβολές, ασήμαντες ουσιαστικά, οδηγούν τελικά σε πλήρη παραμόρφωση ή, καλύτερα, μεταμόρφωση του αντικειμένου. Κατά την ίδια έννοια, μικρές μεταβολές από την κατάσταση υγείας οδηγούν, τελικά, στο άκρο της νόσου. Αν το πουλί είναι η απόλυτη υγεία και το ψάρι είναι η απόλυτη νόσος, όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις εκφράζουν ταυτόχρονα βαθμό υγείας και νόσου (εικ. 1).

Το 1965, ο Lofti Zadeh, στην εργασία του "Fuzzy Sets", συνέθεσε σε σύνολο οργανωμένο και κατέστησε εμφανή τη σημασία και τη σπουδαιότητα της ασαφούς λογικής. Η κύρια ιδέα στη θεωρία του Zadeh είναι η συγχώνευση της κλασικής λογικής και της θεωρίας του Lukasiewicz στην έννοια των ασαφών συνόλων. Στην ουσία, εισήγαγε την κλασματοποίηση μεταξύ των απόλυτων τιμών 1 και 0 της κλασικής λογικής.

Το ασαφές σύνολο περιέχει μέλη, τα οποία ανήκουν σε αυτό εν μέρει, κατά βαθμό. Το τυπικό παράδειγμα ασαφούς συνόλου είναι το «σύνολο των υψηλών αν-



Εικόνα 1. Παρατηρήστε τη μεταμόρφωση των πουλιών σε ψάρια στην έξω δεξιά σειρά της εικόνας από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά (μαύρα σχήματα). Παρατηρήστε επίσης τη μεταμόρφωση των ψαριών σε βατράχους, πρώτη και δεύτερη σειρά από κάτω προς τα πάνω, στο δεξιό κάτω τέταρτο της εικόνας.

θρώπων». Έστω ότι ο X έχει ύψος 167 cm. Ανήκει ο X στο σύνολο των υψηλών ατόμων; Στο κλασικό σύνολο των υψηλών ατόμων η ερώτηση που τίθεται είναι: «είναι ο X υψηλός;» και για να απαντηθεί η ερώτηση, θα πρέπει το ύψος του X να συγκριθεί με το (αυθαίρετο) όριο, πάνω από το οποίο κάποιος ορίζεται ως υψηλός (ανήκει στο σύνολο των υψηλών ατόμων) και κάτω από το οποίο ορίζεται ως όχι υψηλός (δεν ανήκει στο σύνολο των υψηλών ατόμων). Αν, π.χ., το όριο είναι 165 cm, σύμφωνα με την κλασική λογική, ο X ανήκει στο σύνολο των υψηλών ατόμων, εφόσον το ύψος του υπερβαίνει τα 165 cm.

Στη θεωρία των ασαφών συνόλων, το ερώτημα που τίθεται δεν είναι αν ο X είναι υψηλός ή όχι, αλλά «πόσο υψηλός είναι ο X». Με άλλα λόγια, σε τι ποσοστό ανήκει ο X στο σύνολο των υψηλών ατόμων. Αν το σημείο τομής μεταξύ υψηλών και όχι υψηλών ατόμων τεθεί στα 170 cm, τότε, σύμφωνα με την κλασική λογική, άτομα κάτω των 170 cm ύψους δεν συμπεριλαμβάνονται στο σύνολο των υψηλών ατόμων, έστω και αν η διαφορά τους από το σημείο τομής είναι 1 cm (ύψος 169 cm). Αντίθετα, στην ασαφή λογική, που είναι διαβαθμισμένη, είναι ο βαθμός συμμετοχής στο σύνολο που καθορίζει τα πράγματα και την απάντηση στην ερώτηση σε τι βαθμό είναι κάποιος υψηλός και όχι απόλυτα εάν είναι υψηλός ή όχι.

Παράδειγμα. Έστω ότι τα όρια του ύψους, στο οποίο μπορεί να φθάσει ή έχει περιγραφεί ότι έχει φθάσει ανθρώπινο, είναι 285 cm (ο Ρώσος γίγαντας Μάκνωφ)

* Maurits Cornelius Escher. Ολλανδός γραφίστας (1898–1971). Ανέπτυξε μεγάλη δεξιοτεχνία στην απεικόνιση απροσδόκων μεταμορφώσεων αντικειμένων. Τα έργα του κίνησαν το ενδιαφέρον τόσο των ψυχολόγων, όσο και των μαθηματικών.

και 140 cm (ύψος που χαρακτηρίζει το νανισμό). Έστω τώρα ότι πέντε άτομα έχουν τα ακόλουθα ύψη: 190 cm, 180 cm, 170 cm, 169 cm, 150 cm. Στην κλασική λογική του ναι-όχι, τα τρία πρώτα άτομα συμπεριλαμβάνονται στο σύνολο των υψηλών ατόμων (εφόσον το όριο είναι το 170 cm), ενώ το τέταρτο, παρόλο που η διαφορά του από το τρίτο είναι μόλις 1 cm, δεν συμπεριλαμβάνεται. Αντίθετα, η κατάσταση εκφρασμένη στην ασαφή λογική ως βαθμός συμμετοχής στο σύνολο και ως απάντηση στην ερώτηση πόσο υψηλό είναι το άτομο και όχι αν είναι υψηλό ή όχι, σε δικοτομική διάκριση, καθιστά τα πράγματα «παραδόξως» σαφέστερα και την εκτίμηση του ύψους ακριβέστερη, ενώ παράλληλα καθίσταται εμφανές και το μέγεθος της διαφοράς (πίν. 1). Αν θεωρήσουμε ότι το άτομο με ύψος 285 cm μετέχει 100% στο σύνολο των υψηλών ατόμων, τότε η συμμετοχή των υπολοίπων στο ίδιο σύνολο διαβαθμίζεται όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Έτσι, το άτομο με ύψος 169 cm, το οποίο στη δισθενή ταξινόμηση δεν συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο των υψηλών ατόμων, στην ασαφή-πολυσθενή ταξινόμηση μετέχει του συνόλου κατά 59,3%, μόλις 0,3% κάτω του αμέσως επομένου του (170 cm), που περιλαμβάνεται στο σύνολο των υψηλών ατόμων. (Η διαπίστωση αυτή είναι ευχάριστη για το συγγραφέα, ο οποίος μπορεί να ισχυρίζεται ότι μετέχει του συνόλου κατά 59% περίπου και όχι ότι είναι κοντός).

Τα ασαφή σύνολα αποτελούν μίαν απάντηση στο παράδοξο του σωρού του Ζήνωνα. Κάθε φορά που αφαιρείται ένα κόκκος άμμου από το σωρό, ο σωρός, παραμένοντας σωρός, έχει μικρότερη συμμετοχή στο σύνολο. Το χαρακτηριστικό της ασαφούς λογικής και των συνόλων της είναι ότι εκφράζουν βαθμό συμμετοχής, περισσότερο, παρά σύνολο μελών. Εκτός αυτού, όμως, περιλαμβάνουν και διακεκριμένα σύνολα, ασαφή δηλαδή σύνολα, τα οποία έχουν βαθμό συμμετοχής 1 και 0. Εδώ χρειάζεται μια διασάφηση. Οποιοδήποτε στοιχείο, για να ανήκει σε ένα ασαφές σύνολο, μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή εκτός από 0. Αντίθετα, για να ανήκει σε ένα κλασικό σύνολο, πρέπει να έχει τιμή 1.

5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Η πραγματικότητα, όπως τη βιώνουμε, είναι εμποτισμένη με αβεβαιότητα. Στην καθημερινή κλινική πράξη αυτό είναι κοινός τόπος, που ίσως όμως μας διαφεύγει. Έλλειψη ειδικότητας, ασάφεια, αλληλοσυγκρουόμενα δεδομένα ή καταστάσεις και σύγχυση ως προς την ερμηνεία των δεδομένων, αποτελούν καθημερινή πραγματικότητα για τον κλινικό που διαθέτει κριτική κλινική κρίση και γνώση.

Παράδειγμα. Αυξημένη τιμή της αλκαλικής φωσφατάσης μπορεί να υποδηλώνει αποφρακτικό ίκτερο, κίρρωση ή χωροκατακτητική βλάβη.¹³ Η εξέταση αυτή, ενώ διαχωρίζει ως ομάδα αυτές τις παθήσεις από άλλες, δεν διαφορίζει μεταξύ τους. Δεν βοηθά τη διάκριση των επιμέρους παθήσεων. Με άλλα λόγια, στερείται ειδικότητας και η έλλειψη ειδικότητας σημαίνει έλλειψη πληροφορίας.

Ακόμη και οι ακριβέστερες εργαστηριακές εξετάσεις, στις οποίες βασίζουμε τη διάγνωση μας, ενέχουν άλλοτε άλλο βαθμό αβεβαιότητας, που εκφράζεται στη σχέση της ευαισθησίας της εργαστηριακής εξέτασης και της ψευδώς θετικής τιμής της. Τα λειτουργικά αυτά χαρακτηριστικά (που σπανιότατα έχουν τιμή 1 και 0, αντίστοιχα) συμπυκνώνουν την πληροφορία που περιέχεται στην εργαστηριακή εξέταση.

Είναι γνωστό ότι όλες οι εργαστηριακές εξετάσεις συγκρίνονται με ένα απόλυτο κριτήριο αληθείας, το λεγόμενο gold standard, το οποίο όμως, και αυτό, σπανιότατα είναι «χρυσό» και συνήθως, και αυτό, ενέχει βαθμό αβεβαιότητας. Έτσι, ουσιαστικά, έχουμε μια αβέβαιη εξέταση βασισμένη σε ένα επίσης αβέβαιο κριτήριο αληθείας. Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία για τα προβλήματα που σχετίζονται με ατέλειες του gold standard.¹⁴⁻¹⁷ Ουσιαστικά, δεν υπάρχει τέλειο gold standard ή απόλυτο κριτήριο αληθείας.

Γαλουχημένοι με την κλασική λογική, προσπαθούμε να βρούμε τρόπους (στρουθοκαμηλίζοντας) να αποφύγουμε την αβεβαιότητα, αντί να μάθουμε πώς να τη χειριζόμαστε. Να τη μετράμε και να την περιλαμβάνουμε στις παραμέτρους του υπό λύση προβλήματος. «Όταν η

Πίνακας 1. Ταξινόμηση βάσει κλασικής (δισθενούς) και ασαφούς (πολυσθενούς) λογικής.

Άτομα	Ύψος (cm)	Δισθενής ταξινόμηση (1-0)	Ασαφής (πολυσθενής) (%)
A	190	1	66,7
B	180	1	63,1
Γ	170	1	59,6
Δ	169	0	59,3
E	150	0	52,6

πολυπλοκότητα μεγαλώνει, πρέπει να παραιτηθούμε από κάτι. Και αυτό, από το οποίο πρέπει να παραιτηθούμε, είναι η βεβαιότητα» τονίζει ο Klir.

Ίσως δεν το συνειδητοποιούμε, αλλά σκεφτόμαστε με κανόνες του τύπου «ΕΑΝ αυτό, ΤΟΤΕ εκείνο». Με αυτούς τους κανόνες συνδυάζουμε ιδέες και συσχετίζουμε δεδομένα με αποτελέσματα.

- ΕΑΝ η θερμοκρασία του ορθού είναι άνω των 38,2 °C, ΤΟΤΕ ο άρρωστος έχει πυρετό.
- ΕΑΝ διαπιστώσω (με την αντικειμενική εξέταση) μείωση του αναπνευστικού ψιθυρίσματος, αμβλύτητα, αύξηση των φωνητικών δονήσεων, σωληνώδες φύσημα (βρογχική αναπνοή), ΤΟΤΕ ο άρρωστος έχει πνευμονική πύκνωση.
- ΕΑΝ έχει θετική την εξέταση της τροπονίνης, ΤΟΤΕ ο άρρωστος έχει έμφραγμα.
- ΕΑΝ έχει δερματικές ασβετώσεις, φαινόμενο Raynaud, δυσκινησία του οισοφάγου, σκληροδακτυλία, τηλαγγειεκτασία, ΤΟΤΕ έχει το σύνδρομο CREST (calcinosis cutis, Raynaud, esophageal dysmotility, sclerodactyly, telangiectasia).

Γίνεται φανερό από τα παραπάνω παραδείγματα ότι όλη η Κλινική Ιατρική, από τον ορισμό της απλούστερης παραμέτρου (π.χ. πυρετός), την αντικειμενική εξέταση, μέχρι τη διαφορική διαγνωστική, βασίζεται σε κανόνες του τύπου ΕΑΝ... ΤΟΤΕ... . Στην ασαφή λογική, αυτοί οι κανόνες είναι (καλούνται) ασαφείς, διότι η πραγματικότητα είναι ασαφής (εμποτισμένη με αβεβαιότητα) και αυτή την πραγματικότητα προσπαθεί να προσεγγίσει και να περιγράψει η ασαφής λογική.

Η βασική έννοια για την κατανόηση της ασαφούς λογικής είναι ότι τα ασαφή σύνολα είναι «σύνολα διαβάθμισης μάλλον παρά σύνολα που έχουν μέλη». ^{19,20} Η μεγάλη αποτυχία της τεχνητής ευφυΐας (artificial intelligence) να κωδικοποιήσει την ουσία της ανθρώπινης σκέψης σε ένα κουτί (ηλεκτρονικό υπολογιστή) σαφών κανόνων ναι-όχι, 1-0, έδειξε και απέδειξε ότι η κοινή λογική, με την οποία καθημερινώς αντιμετωπίζουμε ως ανθρώπινα σκεπτόμενα όντα την πραγματικότητα, είναι ζήτημα βαθμού και όχι διχοτομημένη σε ναι-όχι, 0-1. Οι τεχνοκράτες της τεχνητής ευφυΐας προσδιόρισαν δίχρωμους κανόνες σκέπτεσθαι, από τους οποίους όμως εξαφάνισαν κάθε απόχρωση. Η πραγματικότητα, όμως, δεν είναι ασπρόμαυρη ούτε και η ουσία της ανθρώπινης σκέψης. Είναι σαν να κάνεις ένα χάρτη των Αθηνών βασισμένος μόνο σε πληροφορίες, χωρίς ποτέ να έχεις επισκεφθεί τα πραγματικά μέρη που απεικονίζεις.

Η Κλινική Ιατρική δεν είναι μηχανικό πεδίο εφαρμογής διχοτομικών κανόνων. Αντιθέτως μάλιστα. Ο ορι-

σμός των νοσημάτων είναι ασαφής και όχι πλήρης. Για παράδειγμα, η τόσο κοινή και καθημερινή για τον κλινικό και τόσοσους αρρώστους καρδιακή ανεπάρκεια ορίζεται ως η κατάσταση, κατά την οποία «μια διαταραχή στην καρδιακή λειτουργία είναι υπεύθυνη για τη μειωμένη ικανότητα της καρδιάς να προωθήσει αίμα σε βαθμό που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του μεταβολισμού των ιστών ή μπορεί να το κάνει αυτό μόνο με έναν παθολογικά αυξημένο διαστολικό όγκο». Οι λέξεις σε πλάγια γραφή χαρακτηρίζονται από ασάφεια και επιδέχονται ή δηλώνουν διαβάθμιση.

Η ασαφής λογική περιγράφει την πραγματικότητα ως ασαφή (και τέτοια είναι) χρησιμοποιώντας ασαφείς κανόνες, οι οποίοι ορίζουν μια ασαφή επιφάνεια και όχι ένα σημείο τομής, όπως συμβαίνει στη δισθενή λογική του ναι ή όχι, είναι ή δεν είναι. Είναι περισσότερο ηρακλείτεια (...πυρ απότομον μέτρα και σθενύμενον μέτρα), *²² παρά αριστοτελική (ή Α ή Β. Τρίτο δεν χωρεί. Το αξίωμα του αποκλεισμού του τρίτου) ή, καλύτερα, αριστοτελική στα άκρα της σωρός-όχι σωρός, αλλά ηρακλείτεια στο μεταξύ αυτών διάστημα, όπου το αντικείμενο είναι σε ένα βαθμό σωρός και σε ένα βαθμό όχι σωρός.

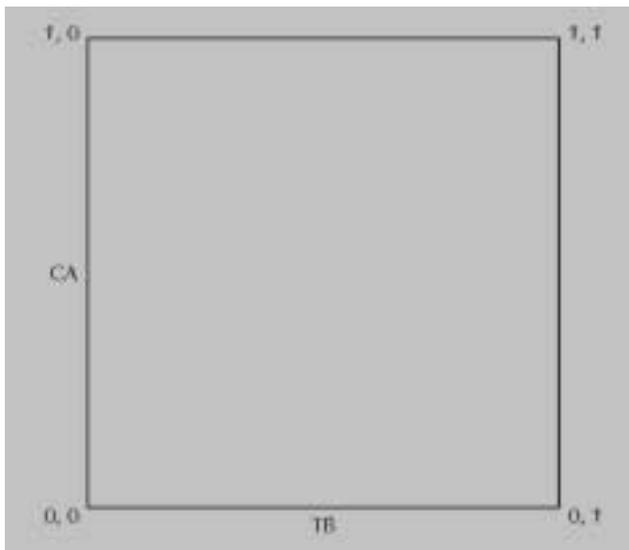
Παράδειγμα. Το παράδειγμα αυτό βασίζεται σε ανάλογο παράδειγμα, που περιγράφεται από τον Bart Kosko και τις έννοιες BIT (binary units: 1,0) και FITS (fuzzy units: βαθμός συμμετοχής στο σύνολο μεταξύ 0 και 1), που ο ίδιος χρησιμοποίησε.²³ Έστω ότι άρρωστος X έχει κλινικοεργαστηριακά και απεικονιστικά ευρήματα τέτοια, ώστε τα δύο ενδεχόμενα που εξετάζει ο κλινικός είναι καρκίνος πνεύμονα (CA) ή φυματίωση (TB). Σύμφωνα με τη δίτημη λογική, τα δυνατά ενδεχόμενα είναι:

- CA και όχι TB (1, 0)
- Όχι CA Ναι TB (0, 1)
- CA και TB (1, 1)
- Ούτε TB ούτε CA (0, 0)

Οι 4 αυτές περιπτώσεις, εκφρασμένες σε BIT, παίρνουν τις τιμές που αναγράφονται σε παρενθέσεις δίπλα από κάθε περίπτωση.

Ας απεικονίσουμε αυτά τα ενδεχόμενα και τις τιμές τους σε ένα τετράγωνο, στο οποίο ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη φυματίωση και ο κάθετος στον καρκίνο (εικ. 2). Αν δεχθούμε ότι αποδεικτική εξέταση για τον CA είναι θε-

* Το πλήρες απόσπασμα αναφέρεται στη δημιουργία του κόσμου και, σε ελεύθερη απόδοση, λέει ότι τον κόσμο αυτόν ουδείς των θεών ή των ανθρώπων εποίησε αλλά είναι και ήταν φωτιά πάντοτε ζωντανή, που σβήνει και ανάβει διαβαθμισμένα.



Εικόνα 2. Τα ενδεχόμενα καρκίνου (CA) και φυματίωσης (TB) εκφρασμένα σε τιμές BIT (εντός παρενθέσεων)

- CA και όχι TB (1, 0)
- Όχι CA Ναι TB (0, 1)
- CA και TB (1, 1)
- Ούτε TB ούτε CA (0, 0)

Στο τετράγωνο της εικόνας απεικονίζουμε αυτά τα ενδεχόμενα και τις τιμές τους. Ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη φυματίωση και ο κάθετος στον καρκίνο. Αν δεχθούμε ότι αποδεικτική εξέταση για τον CA είναι θετική κυτταρολογική και για την TB θετικά πύελα (μικροσκοπική εξέταση ή καλλιέργεια) για B. Koch, στην κάτω αριστερή γωνία είναι η περίπτωση όπου ο άρρωστος δεν έχει ούτε καρκίνο ούτε φυματίωση: 0, 0 (βλ. υποσημείωση στο κείμενο) και στην επάνω δεξιά είναι η περίπτωση όπου ο άρρωστος έχει και φυματίωση και καρκίνο: 1, 1. Στην κάτω δεξιά γωνία ο άρρωστος έχει φυματίωση αλλά δεν έχει καρκίνο: 0, 1 και στην άνω αριστερή η περίπτωση όπου ο άρρωστος δεν έχει φυματίωση αλλά έχει καρκίνο: 1, 0 (θετικά πύελα για B. Koch, αρνητική κυτταρολογική). Αυτά συμβαίνουν στα άκρα, όταν είμαστε σίγουροι από τις ανάλογες εξετάσεις ότι ο άρρωστος έχει ή δεν έχει τη συγκεκριμένη νόσο.

τική κυτταρολογική και για την TB θετικά πύελα (μικροσκοπική εξέταση ή καλλιέργεια) για B. Koch:

- Στην κάτω αριστερή γωνία είναι η περίπτωση όπου ο άρρωστος δεν έχει ούτε καρκίνο ούτε φυματίωση (αρνητικά πύελα για B. Koch και αρνητική κυτταρολογική,* 0, 0) και στην επάνω δεξιά είναι η περίπτωση όπου ο άρ-

ρωστος έχει και φυματίωση και καρκίνο (θετικά πύελα για B. Koch και θετική κυτταρολογική)

- Στην επάνω αριστερή γωνία είναι η περίπτωση όπου ο άρρωστος δεν έχει φυματίωση αλλά έχει καρκίνο: 0, 1 (αρνητικά πύελα για B. Koch και αρνητική κυτταρολογική) και στην κάτω δεξιά γωνία η περίπτωση όπου ο άρρωστος έχει φυματίωση αλλά δεν έχει καρκίνο: 1, 0 (θετικά πύελα για B. Koch, αρνητική κυτταρολογική).

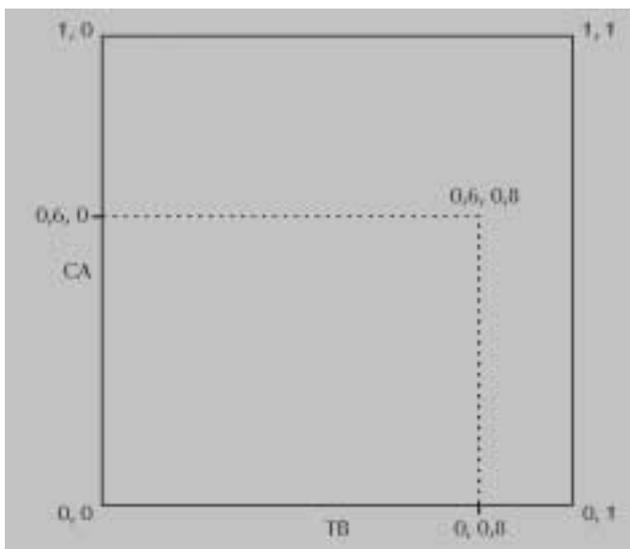
Αυτά συμβαίνουν στα άκρα, όταν είμαστε σίγουροι από τις ανάλογες εξετάσεις ότι ο άρρωστος έχει ή δεν έχει τη συγκεκριμένη νόσο. Όταν όμως οι αποδεικτικές εξετάσεις δεν είναι ακόμη διαθέσιμες, η κατάσταση χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα ως προς τη διάγνωση. Εδώ, εμφανίζεται η γκριζα περιοχή μεταξύ του 0 και 1, του Ναι και Όχι ταυτοχρόνως. Ο άρρωστος στη συγκεκριμένη κατάσταση πραγμάτων «έχει και δεν έχει τη νόσο». Υποθέστε ότι πιθανολογούμε ότι, βάσει των διαθέσιμων κλινικοαπεικονιστικών δεδομένων, ο άρρωστος έχει πιθανότητα* φυματίωσης 80% και καρκίνου 60%. Αν, για πρακτικούς λόγους, εκφράσουμε αυτά τα ποσοστά ως βαθμό συμμετοχής στα ασαφή σύνολα φυματίωση και καρκίνος: 0,8 και 0,6, αντίστοιχα, έχουμε μια ακριβέστερη απεικόνιση της κατάστασης και πιο πραγματική, αντί να πούμε, με τα στη διάθεσή μας, το δεδομένο χρόνο, δεδομένα ότι ο άρρωστος έχει ή καρκίνο ή φυματίωση. Η κατάσταση του αρρώστου ως προς τις δύο παθήσεις απεικονίζεται στην εικόνα 3.

Η ασαφής λογική δεν εξετάζει ούτε και αξιολογεί, απλώς, τον κανόνα και ακολουθεί τον έναν ή τον άλλο δρόμο. Οι ασαφείς κανόνες πυροδοτούνται ταυτόχρονα όλοι, αλλά σε διαφορετικό βαθμό έκαστος. Κατά κάποιο τρόπο, ακολουθούνται όλα τα κλαδιά του δένδρου και λαμβάνεται ένας διαβαθμισμένος, ζυγισμένος, μέσος όρος των αποτελεσμάτων.¹⁹ Ουσιαστικά, πρόκειται για εν παραλλήλω επεξεργασία και ενεργοποίηση των κανόνων αντί της εν σειρά (ο ένας μετά τον άλλον) διαδικασίας, που ακολουθείται στις άλλες περιπτώσεις.

Παράλληλα, η εφαρμογή της ασαφούς λογικής σε ασαφή (και κλινικά) προβλήματα, τα οποία είναι τα πραγματικά προβλήματα της καθημερινής (και κλινικής) πρακτικής, επιτρέπει, θυσιάζοντας την ακρίβεια της αριθμη-

* Προφανώς, τα αρνητικά πύελα δεν αποτελούν και τη μοναδική ή τελική εξέταση των αρρώστων με υποψία TB ή CA. Μπορεί οι εξετάσεις αυτές να είναι αρνητικές και να αποβεί θετική η καλλιέργεια ή να βρεθεί νεόπλασμα κατά τη βιοψία. Η απλούστευση, όμως, ισχύει για την καλύτερη κατανόηση της ιδέας ότι στην κάτω αριστερή και άνω δεξιά γωνία του τετραγώνου ισχύει η δίμημη λογική, ενώ στο ενδιάμεσο κυριαρχεί η ασαφής πολυδύναμη διαβαθμισμένη ασαφής λογική.

* Η έννοια της πιθανότητας δεν είναι ταυτόσημη με το βαθμό συμμετοχής στο ασαφές σύνολο. Τη χρησιμοποιώ εδώ για πρακτικούς λόγους και περισσότερο διότι η εξοικείωση με την έννοια της πιθανότητας είναι μεγαλύτερη στους περισσότερους από εμάς. Θα μπορούσε να πει κανείς απευθείας ότι υπολογίζει το βαθμό συμμετοχής στο ασαφές σύνολο, χωρίς να αναφέρεται σε πιθανότητες.



Εικόνα 3. Όταν οι αποδεικτικές εξετάσεις δεν είναι ακόμη διαθέσιμες, η κατάσταση χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα ως προς τη διάγνωση. Εδώ, εμφανίζεται η γκριζα περιοχή μεταξύ του 0 και 1, του Ναι και Όχι ταυτοχρόνως. Ο άρρωστος, στη συγκεκριμένη κατάσταση πραγμάτων, «έχει και δεν έχει τη νόσο». Υποθέστε ότι πιθανολογούμε ότι, βάσει των διαθέσιμων κλινικοαπεικονιστικών δεδομένων, ο άρρωστος έχει πιθανότητα (βλ. υποσημείωση στο κείμενο) φυματίωσης 80% και καρκίνου 60%. Αν, για πρακτικούς λόγους, εκφράσουμε αυτά τα ποσοστά ως βαθμό συμμετοχής στα ασαφή σύνολα φυματίωση και καρκίνος: 0,8 και 0,6, αντίστοιχα, έχουμε μια ακριβέστερη απεικόνιση της κατάστασης και πιο πραγματική, αντί να πούμε, με τα στη διάθεσή μας, το δεδομένο χρώμα, δεδομένα ότι ο άρρωστος έχει ή καρκίνου ή φυματίωση.

τικής (ακέραιο σημείο. Ναι ή Όχι) στην ποιοτική έκφραση (ασαφή. Επιφάνεια διαβαθμισμένη. Συμμετοχή στο σύνολο) των δεδομένων, την πρόσκτηση περισσότερων πληροφοριών, καταλήγοντας, παραδόξως, σε περισσότερη ακρίβεια.

Παράδειγμα. Έστω ότι θέλετε να μελετήσετε όλους τους αρρώστους ηλικίας κάτω των 50 ετών που έχουν ταχύτητα καθίζησης (ΤΚΕ) άνω του 99 (τριπήφια ΤΚΕ), με σκοπό τη διερεύνηση του ενδεχομένου μυελώματος, λύκου ή κακοήθειας (είναι πρακτικός κανόνας στην Κλινική Ιατρική ότι άρρωστοι με τριπήφια καθίζηση θα πρέπει να ελέγχονται γι' αυτά τα ενδεχόμενα). Χρησιμοποιώντας τη «συγκεκριμένη»,* δίτιμη (Ναι-Όχι) διαδικασία, θα αποκλείσετε από τη μελέτη σας τον Χ, ηλικίας 51 ετών με ΤΚΕ=130, καθώς επίσης τον Ψ, ηλικίας 49 ετών με ΤΚΕ=99, δεδομένου ότι έχετε διχοτομήσει τα κριτήρια της ηλικίας και της ΤΚΕ. Αντίθετα, «ασαφοποιώντας» τα κριτήρια μπορείτε να εκφράσετε την ηλικία σε συνεχή διαστήματα: νεαρός, μεσήλικος, ηλι-

κιωμένος, υπερήλικος και την ΤΚΕ ως φυσιολογική, μετρίως αυξημένη, αυξημένη, πολύ αυξημένη και να διαβαθμίσετε τη συμμετοχή στα σύνολα ηλικία και ΤΚΕ, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, έστω ότι η συμμετοχή στο σύνολο ηλικία είναι των νεαρών 0,40, των ηλικιωμένων 0,6, των μεσήλικων 0,8 και των υπερηλικών 1. Η συμμετοχή στο σύνολο ΤΚΕ είναι φυσιολογική 0,4, μετρίως αυξημένη 0,6, αυξημένη 0,8 και πολύ αυξημένη 1. Με αυτή τη διαδικασία θα καταγραφεί και ο Χ με βαθμό συμμετοχής στο σύνολο ηλικία 0,4 και στο σύνολο ΤΚΕ 0,8 και ο Ψ με βαθμό συμμετοχής στο σύνολο ηλικία 1 και στο σύνολο ΤΚΕ 0,8.

Κατ' αυτόν τον τρόπο και αντίθετα με τη λειτουργία των κλασικών κριτηρίων, που είτε ικανοποιούνται είτε όχι απολύτως, η ασαφής λογική επιτρέπει διαφορετικό βαθμό ικανοποίησης πάνω από το μηδέν (όχι) και κάτω από το ένα (ναι). Έτσι, μπορεί να επιλεγεί η αμέσως καλύτερη λύση, χωρίς να αποκλείεται καμιά, όσο μικρό βαθμό συμμετοχής κι αν έχει στο σύνολο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο αποφασίζων έχει τη δυνατότητα να επιλέξει με βαθμό βεβαιότητας ή αβεβαιότητας καλύτερα, αντί να αναζητά εναγωνίως και πολλές φορές αφελώς να αποδέχεται τη βεβαιότητα του ναι-όχι.

6. ΑΣΑΦΕΙΣ ΚΑΝΟΝΕΣ, ΣΑΦΕΙΣ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ ΑΣΑΦΟΠΟΙΗΣΗ (FUZZIFYING) ΚΑΙ ΑΠΟΑΣΑΦΟΠΟΙΗΣΗ (DEFUZZIFYING)

Στην καρδιά της πληροφορίας ως εργαλείου χειρισμού του περιβάλλοντος, αλλά και του εγκεφάλου, βρίσκεται η έννοια του ελέγχου. Έλεγχος σημαίνει χειρισμός του περιβάλλοντος προς επίτευξη ορισμένου ή κάποιου σκοπού-στόχου.²⁴ Ουσιαστικά, ο έλεγχος είναι η επεξεργασία πληροφοριών, που περιλαμβάνει την αναζήτηση και πρόσκτηση της πληροφορίας (είσοδος: input), την εφαρμογή κανόνων επί των πληροφοριακών δεδομένων (επεξεργασία: process) και τη δράση επί των αποτελεσμάτων αυτής της επεξεργασίας (έξοδος: output).²⁴ Η κοινή και συχνή αντίληψη ότι έλεγχος σημαίνει και είναι δράση, είναι παραπλανητική και εσφαλμένη. Χωρίς πρόσκτηση και αξιολόγηση πληροφοριών και εφαρμογή των ορθών κανόνων στο υλικό αυτό, ο έλεγχος ξεστρατίζει σε αυθαιρεσία και επιπόλαιη δράση.

Το μυστικό των ασαφών κανόνων έγκειται στο ότι ορίζουν ασαφείς επιφάνειες και όχι σημείο. Ο κανόνας «εάν ο άρρωστος έχει πυρετό άνω του 38,5 °C, τότε δώστε του αντιπυρετικό» ορίζει ένα σημείο, το οποίο και καθορίζει τη δράση. Εντούτοις, ο άρρωστος με θερμοκρασία 38,4 °C δεν περιλαμβάνεται στην ενέργεια που καθορίζει ο κανόνας.

Αντίθετα, χρησιμοποιώντας την έννοια των ασαφών κανόνων που προσδιορίζουν ασαφείς επιφάνειες και ο-

* Συγκεκριμένη με την έννοια του σαφούς καθορισμού τιμών και σε αντιδιαστολή προς την ασαφή.

ρίζοντας τον πυρετό ως μέτριο, υψηλό και πολύ υψηλό πυρετό, με εύρος τις τιμές 37,5–38,5 °C για το μέτριο, 38,3–39 °C για τον υψηλό και 38,6–40 °C για τον πολύ υψηλό, η κατάσταση των πραγμάτων αποδίδεται καλύτερα και επιτρέπει πρακτικότερες αποφάσεις. Ο ασαφής κανόνας τώρα ορίζει: Εάν ο άρρωστος έχει μέτριο ή υψηλό πυρετό, χορηγήστε αντιπυρετικό. Σημειώστε ότι οι επιφάνειες που ορίζονται από το εύρος τιμών της θερμοκρασίας αλληλοεπικαλύπτονται εν μέρει. Έτσι, όταν η κατάσταση δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί με συγκεκριμένους κανόνες, οι ασαφείς κανόνες μπορούν να την προσεγγίσουν και να την περιγράψουν επαρκώς.

Σε γενικές γραμμές, ένα ασαφές σύστημα περιλαμβάνει ασαφείς κανόνες, οι οποίοι προσδιορίζουν ασαφείς επιφάνειες, οι οποίες αποτελούν την έκφραση της πολυπλοκότητας της πραγματικότητας σε απλοποιημένη μορφή, που είναι εύκολο να γίνει κατανοητή και να απεικονιστεί. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, θα κατασκευάσουμε ένα ασαφές σύστημα, σύμφωνα με τις οδηγίες του Bart Kosko.²⁵

Έστω άρρωστος σε shock που χρειάζεται αγγειοσπαστικά για την υποστήριξη της αρτηριακής πίεσης. Επιλέγεται η χορήγηση ντοπαμίνης, της οποίας η δοσολογία κυμαίνεται από 2–50 μg/kg/min. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της δοσολογίας της ντοπαμίνης για τη διατήρηση σταθερής αρτηριακής πίεσης άνω των 90 mmHg και την, κατά το δυνατόν, αποφυγή απότομων αυξομειώσεών της.

Για τη δημιουργία του ασαφούς συστήματος shock-ντοπαμίνης:

1. Επιλέγουμε τις μεταβλητές. Έστω οι μεταβλητές X, που αποτελεί και την είσοδο (input), και Ψ, που αποτελεί την έξοδο (output). Η σχέση των δύο μεταβλητών εκφράζεται με τον ασαφή κανόνα «ΕΑΝ X, ΤΟΤΕ Ψ», που σχετίζει τις δύο μεταβλητές με σχέση αιτίου-αιτιατού. Στο ασαφές σύστημα «shock-ντοπαμίνη», η μεταβλητή Ψ (στον οριζόντιο άξονα) εκφράζει τη δοσολογία της ντοπαμίνης σε μg/kg/min και η X τη μεταβολή της αρτηριακής πίεσης. Στόχος μας είναι να αυξάνεται η δοσολογία της ντοπαμίνης, όταν η πίεση πέφτει και να μειώνεται, όταν ανεβαίνει. Σε αυτό συνίσταται και ο έλεγχος του συστήματος. Σημειώστε ότι όλο το εύρος της δοσολογίας της ντοπαμίνης και των τιμών της αρτηριακής πίεσης εκφράζει ένα συνεχές τιμών στον αντίστοιχο άξονα και ότι η ποιοτική έκφραση υψηλή, ικανοποιητική κ.λπ. απεικονίζεται με ασαφείς επιφάνειες, που παρουσιάζουν επικαλύψεις. Ο λόγος, επαναλαμβάνω και εδώ, είναι ότι στην ασαφή λογική –και αυτή είναι η διαφορά της και το πλεονέκτημά της– δεν υφίστανται συγκεκριμένα όρια αλλά ένα συνεχές, που επιτρέπει την ακριβέστερη και ομαλότερη ρύθμι-

ση. Π.χ., στην ταξινόμηση της αρτηριακής υπέρτασης στο βιβλίο Εσωτερικής Παθολογίας του Harrison²⁶ ακολουθεί η ακόλουθη διαβάθμιση: Ήπια: 140–159/85–89 mmHg, μέτρια: 160–179/100–109 mmHg, υψηλή: 180–209/110–119 mmHg, πολύ υψηλή: ≥210/≥120 mmHg. Εντούτοις, θα μπορούσε συστολική αρτηριακή πίεση 175 mmHg να θεωρηθεί υψηλή σε άτομο ηλικίας 20 ετών και αρτηριακή πίεση 165 mmHg να θεωρηθεί ήπια σε άτομο 80 ετών. Με άλλα λόγια, η αλληλοεπικάλυψη επιτρέπει ελαστικότητα και είναι πιο κοντά στην αβεβαιότητα και σχετικότητα της πραγματικότητας, επιτρέπει δε ορθολογικότερο έλεγχο του συστήματος.

2. Ορίζουμε τα ασαφή σύνολα του συστήματος, δηλαδή τα υποσύνολα* που ανήκουν στις δύο μεταβλητές X (αρτηριακή πίεση) και Ψ (ντοπαμίνη). Έστω ότι τα σύνολα για τη μεταβλητή X είναι απροσδιόριστη (με εύρος τιμών από 0–60 mmHg), πολύ χαμηλή (50–80 mmHg), χαμηλή (70–90 mmHg), ικανοποιητική (>85 mmHg) και για τη μεταβλητή Ψ μέγιστη δοσολογία**²⁷ (20–50 μg/kg/min), υψηλή δοσολογία (10–25 μg/kg/min), μέτρια δοσολογία (5–15 μg/kg/min), χαμηλή δοσολογία (0–7,5 μg/kg/min). Τα σύνολα αυτά, τα οποία έχουν τη μορφή ασαφών επιφανειών, τα απεικονίζουμε στον οριζόντιο άξονα X (εικ. 4).
3. Στη συνέχεια καταγράφουμε τους ασαφείς κανόνες, οι οποίοι συσχετίζουν τα υποσύνολα της αρτηριακής πίεσης με τα σύνολα της ντοπαμίνης. Προσδιορίζουμε σε κάθε υποσύνολο αρτηριακής πίεσης ένα αντίστοιχο υποσύνολο ντοπαμίνης. Προφανώς, όταν η πίεση είναι απροσδιόριστη, θα πρέπει να αυξήσουμε τη δοσολογία στο μέγιστο, ενώ αν είναι φυσιολογική, θα πρέπει να διακόψουμε το φάρμακο (μηδενική δοσολογία). Κατ' αναλογία, όταν η πίεση είναι ικανοποιητική, η δοσολογία θα πρέπει να είναι χαμηλή, ενώ όταν είναι χαμηλή, η δοσολογία θα πρέπει να είναι μέτρια.

Η διαμόρφωση των ασαφών κανόνων βασίζεται στην κοινή λογική, που λέει ότι ο βέλτιστος έλεγχος του συστήματος επιτυγχάνεται όταν μικρές μεταβολές της εισόδου (αρτηριακή πίεση) οδηγούν σε αντίστοιχες μεταβολές της εξόδου (δοσολογία ντοπαμίνης), ώστε η διόρθωση (εφόσον είναι αναγκαία) της αρτηριακής πίεσης να είναι, ει δυνατόν, στιγμιαία, με ανάλογη προσαρμογή της δοσολογίας της ντοπαμίνης, ώστε να αποφεύγονται εξάρσεις και υφέσεις της αρτηριακής πίεσης σε α-

* Η έννοια του συνόλου είναι γενική και περιλαμβάνει και το υποσύνολο, το οποίο είναι επίσης ένα σύνολο.

** Η δοσολογία βασίζεται στην αναγραφόμενη στην τελευταία έκδοση (2001) του *Harrison's Principles of Internal Medicine*.

κράιες τιμές, που δύσκολα διορθώνονται και έχουν την τάση να αποδιοργανώσουν το σύστημα, ενώ παράλληλα δυσχεραίνουν τον ακριβή έλεγχο του.

Οι κανόνες που προσδιορίζουν τον ακριβή και επιθυμητό έλεγχο της αρτηριακής πίεσης στο shock είναι βασισμένοι στα ανωτέρω και είναι οι ακόλουθοι:

- α. EAN η αρτηριακή πίεση είναι απροσδιόριστη, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης μέγιστη
- β. EAN η αρτηριακή πίεση είναι πολύ χαμηλή, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης υψηλή
- γ. EAN η αρτηριακή πίεση είναι χαμηλή, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης μέτρια
- δ. EAN η αρτηριακή πίεση είναι ικανοποιητική, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης χαμηλή.

Εξετάζοντας προσεκτικά τους ασαφείς κανόνες, διαπιστώνει κανείς ότι αντικατοπτρίζουν την αίσθηση της κοινής λογικής. Απροσδιόριστη πίεση-μέγιστη δοσολογία. Ικανοποιητική πίεση-χαμηλή δοσολογία για τη διατήρησή της. Αυτές οι ποιοτικές «ασαφείς» εκφράσεις «απροσδιόριστη», «μέγιστη», «ικανοποιητική», «χαμηλή» εκφράζουν διαβάθμιση και αποτελούν ασαφή υποσύνολα, τα οποία όμως είναι σχετισμένα με αριθμητικές τιμές. Αυτή η συσχέτιση των ασαφών συνόλων προς εύρος αριθμητικών τιμών επιτρέπει να απεικονιστούν αυτά ως επιφάνειες αντί για σημεία τομής (όπως συμβαίνει στη διχοτομική λογική του ναι ή όχι). Στον πίνακα 2 απεικονίζονται οι σχέσεις αρτηριακής πίεσης και δοσολογίας ντοπαμίνης ως έκφραση ασαφών κανόνων, που καταγράφονται στις ανάλογες συντεταγμένες.*

* Προσοχή! Οι αναφερόμενες δοσολογίες δεν αποτελούν απόλυτη θεραπευτική πρόταση και δεν πρέπει να ερμηνευθούν ως τέτοια. Π.χ., σε απροσδιόριστη αρτηριακή πίεση δεν αρχίζει κανείς με τη μέγιστη δοσολογία. Η έναρξη της θεραπείας γίνεται κατά την κλινική κρίση του γιατρού και αρχίζει με μικρή δοσολογία, αυξάνοντας ανάλογα με την ανταπόκριση. Εντούτοις, όταν έχει εκτιμηθεί κλινικά η ανταπόκριση του αρρώστου, το προτεινόμενο σχήμα επιτρέπει μια ομαλή ρύθμιση της αρτηριακής πίεσης, χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις. Εν πάσει περιπτώσει, τα ανωτέρω αποτελούν ένα παράδειγμα των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η εφαρμογή ασαφών κανόνων, σε κλινικά προβλήματα που απαιτούν έναν καλό έλεγχο της κατάστασης με ομαλή ροή «εξόδου», δηλαδή ανταπόκρισης στη θεραπεία. Πρόκειται για ένα συνεχές από το χαμηλότερο στο υψηλότερο σημείο και όχι για σαφώς διακριτές καταστάσεις. Η μετάπτωση, δηλαδή, από την απροσδιόριστη αρτηριακή πίεση προς την πολύ χαμηλή ή το αντίθετο, καθώς και η μέγιστη προς την υψηλή δοσολογία και ταυτόχρονα, δεν έχουν σαφές όριο. Κατ' αυτή την έννοια, η ρύθμιση θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να μην εκφεύγει το σύστημα σε ακραίες τιμές με απότομες αλλαγές της δοσολογίας.

Ο παρατηρητικός αναγνώστης θα προσέξει ότι το παραλληλόγραμμο που ορίζει κάθε κανόνα, είναι το μαθηματικό γινόμενο δύο επιφανειών: της οριζόντιας (σειρά): απροσδιόριστη, πολύ χαμηλή κ.λπ. και της κάθετης (στήλη): μέγιστη, υψηλή κ.λπ. Αυτή είναι μια επιφάνεια που προκύπτει από τη σύνθεση των δύο επιφανειών που την προσδιορίζουν και αποτελεί την απεικόνιση του ασαφούς κανόνα. Οι ασαφείς κανόνες μοιάζουν με επιφάνειες.²⁵ Αν, λοιπόν, τα σύνολα είναι: ικανοποιητική πίεση-χαμηλή δοσολογία, τότε προκύπτει ο ασαφής κανόνας (επιφάνεια) 4.

Αν σκεφτεί κανείς την κατάσταση-παράδειγμα «αρτηριακή πίεση-δοσολογία ντοπαμίνης» με όρους δυναμικούς, δηλαδή εν εξελίξει φαινόμενο στην παράμετρο του χρόνου, εκείνο που έχει σημασία δεν είναι η απόλυτη τιμή της αρτηριακής πίεσης στην είσοδο (input) του συστήματος, αλλά η «απόστασή» της από την επιθυμητή αρτηριακή πίεση. Αυτή η διαφορά αποτελεί και τη χρήσιμη πληροφορία, η οποία χαρακτηρίζει την κατάσταση του συστήματος και η οποία θα αποτελέσει οδηγό για τον προσδιορισμό της τιμής της εξόδου (output), προκειμένου να μειωθεί ή εξαλειφθεί αυτή η διαφορά με την ανάλογη τροποποίηση της δοσολογίας της ντοπαμίνης.

Η αντίληψη αυτή, βασισμένη στην πρωτοποριακή εργασία των Mamdani και Assilian, εισάγει την έννοια της διαβάθμισης της πληροφορίας της εισόδου (εδώ αρτηριακή πίεση) και επιτρέπει τη διαβαθμισμένη επίσης ανταπόκριση της εξόδου (εδώ δοσολογία ντοπαμίνης).

Τα διαβαθμισμένα αυτά ασαφή σύνολα της εισόδου (αρτηριακή πίεση) και της εξόδου (δοσολογία ντοπαμίνης) μπορούν να απεικονιστούν ως αλληλοεπικαλυπτόμενα τρίγωνα στον οριζόντιο και κάθετο άξονα. Η βάση κάθε τριγώνου απεικονίζει το εύρος των τιμών, ενώ αυτό καθαυτό το τρίγωνο αναπαριστά την ποιοτική «ασαφή», αλλά διαβαθμισμένη έκφραση: χαμηλή, απροσδιόριστη κ.λπ. αρτηριακή πίεση, μέγιστη, υψηλή κ.λπ. δοσολογία ντοπαμίνης (εικ. 4). Και εδώ η προέκταση των βάσεων των αντίστοιχων τριγώνων (π.χ. απροσδιόριστη πίεση-μέγιστη δοσολογία) σχηματίζει μια παραλληλόγραμμη επιφάνεια, η οποία αποτελεί το μαθηματικό γινόμενο των δύο γραμμών-βάσεων και ορίζει τον αντίστοιχο ασαφή κανόνα (στο παράδειγμα, κανόνας 1).

Η καταγραφή των ασαφών κανόνων, προφανώς, δεν είναι αυτοσκοπός, αλλά οδηγεί, με βάση αυτούς, σε λήψη αποφάσεων. Σημειώστε ότι στην ασαφή λογική όλοι οι κανόνες ενεργοποιούνται ταυτόχρονα, σε διαφορετικό όμως βαθμό έκαστος (που κυμαίνεται από 0, δη-

Πίνακας 2. Απεικόνιση των σχέσεων αρτηριακής πίεσης και δοσολογίας ντοπαμίνης ως έκφραση ασαφών κανόνων, που καταγράφονται στις ανάλογες συντεταγμένες.

Δοσολογία ντοπαμίνης	Ύψος αρτηριακής πίεσης			
	Απροσδιόριστη	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Ικανοποιητική
Μέγιστη	Κανόνας 1			
Υψηλή		Κανόνας 2		
Μέτρια			Κανόνας 3	
Ελάχιστη				Κανόνας 4

λαδή ο κανόνας είναι πλήρως απενεργοποιημένος, μέχρι 1, δηλαδή απόλυτη ενεργοποίηση του κανόνα).

7. ΑΠΟΑΣΑΦΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΛΩΝ

Προφανώς, δεν είναι δυνατό να δοθεί μια ασαφής οδηγία για τη δοσολογία της ντοπαμίνης, προκειμένου να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο ύψος της αρτηριακής πίεσης. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί να πούμε: δώσε αυξημένη ή μέτρια δοσολογία ντοπαμίνης. Χρειαζόμαστε ένα συγκεκριμένο αριθμό. Τα τρίγωνα δεν είναι αριθμοί. Εντούτοις, προσδιορίζονται ως προς το κέντρο βάρους τους από έναν αριθμό. Και αυτός ο αριθμός εκφράζει το κέντρο της μάζας του ασαφούς συνόλου στην έξοδο (δηλαδή, της συγκεκριμένης πλέον δοσολογίας της ντοπαμίνης). Για παράδειγμα, το κέντρο βάρους του τριγώνου που αντιστοιχεί στο ασαφές σύνολο «μέγιστη» δοσολογία της ντοπαμίνης διέρχεται από τη βάση του και συγκεκριμένα στον αριθμό 35 μg/kg/min, που εκφράζει το μέσο όρο της δοσολογίας της ντοπαμίνης.

Ας δούμε τώρα την έννοια της τριγωνικής απεικόνισης και της διαβάθμισης εν δράσει, εφαρμόζοντας τους 4 κανόνες του παραδείγματος αρτηριακή πίεση-δοσολογία ντοπαμίνης. Ο στόχος είναι ο «ομαλός», χωρίς σημαντικές αυξομειώσεις, έλεγχος της αρτηριακής πίεσης με ανάλογη δοσολόγηση* της ντοπαμίνης.

Στην εικόνα 4, απεικονίζονται οι τέσσερις τριγωνικές επιφάνειες που εκφράζουν τους 4 κανόνες, βάσει των οποίων λειτουργεί το σύστημα. Σημειώστε την αλληλοεπικάλυψη των τριγωνικών επιφανειών και θυμηθείτε ότι οι κανόνες ανά πάσα στιγμή ενεργοποιούνται ταυτόχρονα όλοι, σε διάφορο βαθμό έκαστος.

Έστω ότι η αρτηριακή πίεση του αρρώστου είναι 55 mmHg, αντιστοιχούσα στο ασαφές σύνολο «απροσδιόριστη». Φέρνοντας την κάθετο από το σημείο 55, βλέπουμε ότι αυτή τέμνει τα τρίγωνα που αντιστοιχούν στους κανόνες 1 και 2, στα δεδομένα σημεία που αντιστοιχούν σε ενεργοποίηση αυτών των κανόνων κατά 16%

και 34%, αντίστοιχα, και των υπολοίπων 3 και 4 κανόνων κατά 0% (θυμηθείτε ότι οι κανόνες πάντοτε ενεργοποιούνται όλοι ταυτόχρονα). Έτσι, ο κανόνας 1 «ΕΑΝ η αρτηριακή πίεση είναι απροσδιόριστη, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης μέγιστη» ενεργοποιείται κατά 16% και ο κανόνας 2 «ΕΑΝ η αρτηριακή πίεση πολύ χαμηλή, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης υψηλή» κατά 34%. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στη λευκή επιφάνεια στην τελευταία σειρά της εικόνας. Το κέντρο βάρους αυτής της επιφάνειας διέρχεται διά της τιμής ≈29,5 μg/kg/min, που αποτελεί και τη δοσολογία της ντοπαμίνης για αυτή την κατάσταση του συστήματος.

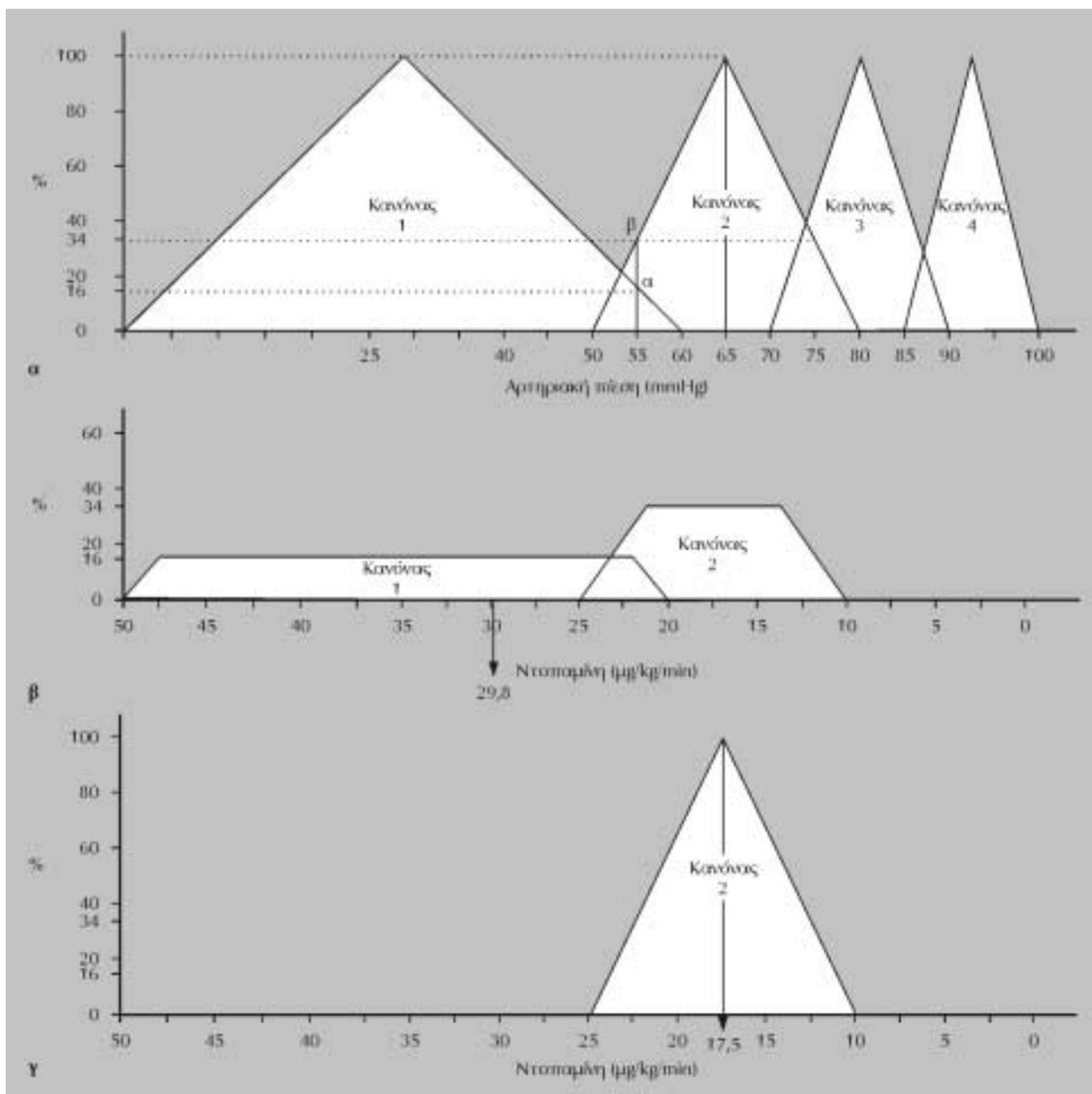
Έστω ότι η επόμενη μέτρηση της αρτηριακής πίεσης δίνει τιμή 65 mmHg. Σε αυτή την περίπτωση, ο κανόνας 2 ενεργοποιείται 100%, ενώ οι λοιποί κατά 0%. Το κέντρο βάρους της τριγωνικής επιφάνειας που προσδιορίζει τον κανόνα 2 διέρχεται διά της τιμής 17,5 μg/kg/min, που αποτελεί και τη δοσολογία της ντοπαμίνης στην περίπτωση αυτή.

Έστω, ότι η επόμενη μέτρηση δίνει τιμή αρτηριακής πίεσης 75 mmHg. Τώρα ενεργοποιείται ο κανόνας 2 κατά 32% και ο κανόνας 3 κατά 45% και οι 1 και 4 κατά 0%. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται με τη λευκή επιφάνεια, της οποίας το κέντρο βάρους διέρχεται διά της τιμής 14 μg/kg/min, που εκφράζει τη δοσολογία της ντοπαμίνης στη νέα τιμή της αρτηριακής πίεσης.

Έστω, τέλος, ότι νέα μέτρηση της αρτηριακής πίεσης δίνει τιμή 90 mmHg. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4, ενεργοποιείται ο κανόνας 4 κατά 66% και οι υπόλοιποι κατά 0%. Η κατάσταση απεικονίζεται στη λευκή επιφάνεια, της οποίας το κέντρο βάρους διέρχεται διά της τιμής 2,5 μg/kg/min, που αποτελεί και τη δοσολογία της ντοπαμίνης.

Είναι φανερό ότι, εργαζόμενοι κατά τον ίδιο τρόπο, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις τιμές της δοσολογίας της ντοπαμίνης για κάθε αντίστοιχη τιμή αρτηριακής πίεσης. Αν φανταστείτε ένα μηχανισμό, ο οποίος συνεχώς αναγιγνώσκει το αποτέλεσμα της ενεργοποίησης των τεσσάρων κανόνων, μπορεί, κατά τον παραπάνω τρόπο, να προσδιορίζει τη δοσολογία της ντοπαμίνης κάθε στιγμή, διατηρώντας το σύστημα σε μια σταθερή κατάσταση, χω-

* Χρησιμοποιώ τον όρο δοσολόγηση, αντί δοσολογία, για να υποδηλώσω την ενεργητική και δυναμική διαδικασία του προσδιορισμού της δοσολογίας ανάλογα με την ανταπόκριση.



Εικόνα 4. Σύστημα ασαφούς λογικής για τη ρύθμιση της αρτηριακής πίεσης (ΑΠ) σε shock. (α) Οριζόντιος άξονας: Ύψος ΑΠ (mmHg): απροσδιόριστη ΑΠ (0–60), πολύ χαμηλή (50–80), χαμηλή (70–90), ικανοποιητική (>85). Κάθετος άξονας: % συμμετοχή του κανόνα στο σύνολο. Σημειώστε την αλληλοεπικάλυψη των τριγωνικών επιφανειών και θυμηθείτε ότι οι κανόνες ανά πάσα στιγμή ενεργοποιούνται ταυτόχρονα όλοι, σε διάφορο βαθμό έκαστος. (β) Οριζόντιος άξονας: Δοσολογία ντοπαμίνης (μg/kg/min): μέγιστη δοσολογία (20–50), υψηλή δοσολογία (10–25), μέτρια δοσολογία (5–15), χαμηλή δοσολογία (0–7,5). Κάθετος άξονας: % συμμετοχή του κανόνα στο σύνολο. Έστω ότι η αρτηριακή πίεση του αρρώστου είναι 55 mmHg, αντιστοιχούσα στο ασαφές σύνολο «απροσδιόριστη». Φέρνοντας την κάθετο από το σημείο 55, βλέπουμε ότι αυτή τέμνει τα τρίγωνα που αντιστοιχούν στους κανόνες 1 και 2 στα δεδομένα σημεία (α και β), όπου αντιστοιχούν σε ενεργοποίηση αυτών των κανόνων κατά 16% και 34%, αντίστοιχα, και των υπόλοιπων 3 και 4 κανόνων κατά 0% (θυμηθείτε ότι οι κανόνες πάντοτε ενεργοποιούνται όλοι ταυτόχρονα). Έτσι, ο κανόνας 1 «ΕΑΝ η αρτηριακή πίεση είναι απροσδιόριστη, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης μέγιστη» ενεργοποιείται κατά 16% και ο κανόνας 2 «ΕΑΝ η αρτηριακή πίεση είναι πολύ χαμηλή, ΤΟΤΕ δοσολογία ντοπαμίνης υψηλή» κατά 45%. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στη λευκή επιφάνεια, το κέντρο βάρους της οποίας διέρχεται διά της τιμής 29,5 μg/kg/min, που αποτελεί και τη δοσολογία της ντοπαμίνης γι' αυτή την κατάσταση του συστήματος. (γ) Οριζόντιος και κάθετος άξονας: Όπως στο Β. Έστω ότι η επόμενη μέτρηση της αρτηριακής πίεσης δίνει τιμή 65 mmHg. Σε αυτή την περίπτωση, ο κανόνας 2 ενεργοποιείται κατά 100%, ενώ οι λοιποί κατά 0%. Το κέντρο βάρους της τριγωνικής επιφάνειας που προσδιορίζει τον κανόνα 2 διέρχεται διά της τιμής 17,5 μg/kg/min, που αποτελεί και τη δοσολογία της ντοπαμίνης στην περίπτωση αυτή.

ρίς υπερβολικές αυξομειώσεις, που θα καθιστούσαν τον έλεγχο της κατάστασης δυσχερή.

Η εφαρμογή της ασαφούς λογικής παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης του συστήματος, όποτε αυτή είναι αναγκαία, όπως π.χ. στη ρύθμιση του σακχάρου του αίματος, της αρτηριακής πίεσης, της οξεοβασικής ισορροπίας και αλλού. Η έννοια της ασαφούς λογικής επιτρέπει την προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης, η οποία δεν είναι ένας απόλυτος αριθμός αλλά δια-

βαθμισμένη και συνεχής, καθώς επίσης και τον πρακτικό έλεγχό της διά της παροχής συγκεκριμένων τιμών (κέντρο βάρους), η οποία επιτυγχάνεται διά της διαδικασίας της αποασαφοποίησης, την οποία περιγράψαμε προηγουμένως.

Εν κατακλείδι, μαζί με τον Αριστοτέλη, ας βάλουμε και λίγο Ζήνωνα και Ηράκλειτο στη λογική μας και την κλινική μας σκέψη. Βοηθάει να δούμε την πραγματικότητα καθαρότερα και ακριβέστερα.

ABSTRACT

Fuzzy logic in clinical medicine

E. ANEVLAVIS

Konstantopouleio General Hospital "Agia Olga", N. Ionia, Athens, Greece

Archives of Hellenic Medicine 2001, 18(4):401-414

We live in a world which is not only uncertain, but also highly complicated. This is obvious in everyday clinical practices: Our brains, the diseases, the very practice of clinical medicine are a highly complicated system. Fuzzy logic, based on the concept of the fuzzy set, allows, between the absolute 1 and 0 values of the classical logic, many values, making truth relative (as it really is in practice). The fuzzy set expresses degrees of membership rather than members, that is, for something to belong to a fuzzy set, it may have any value between 0 and 1, except 0, whereas membership in a classical set requires only one value and this is 1 (it can only be either a member of the set or not). Fuzzy logic describes reality as fuzzy (as it really is) using fuzzy rules of the IF... THEN type, which define a fuzzy area and not a point (yes or no), and these rules are fired in parallel, each in a different degree. Fuzzy rules describe, qualitatively, overlapping fuzzy areas allowing simulation of the real condition of the system. Since fuzzy areas do not determine action based on them (for instance saying that the blood pressure is low is not enough to lead to action), the qualitative data of fuzzy areas are transformed into numerical data so that although an area is not a number it has an average number, which is the center of its "mass", expressed as a weighted average. This is called defuzzification. In this way, fuzzy sets, fuzzification in order to simulate reality, and defuzzification in order to act comprise the hard core of the fuzzy logic and fuzzy systems.

Key words: Defuzzification, Fuzzification, Fuzzy logic, Fuzzy set, Uncertainty

Βιβλιογραφία

- SADEH L. Biological applications of the theory of fuzzy sets and systems. In: The Proceedings of an International Symposium on Biocybernetics of the Central Nervous System. Boston, Little Brown, 1969:199-206
- POUNDSTONE W. *Labyrinths of Reason. Paradox, Puzzles and the Frailty of Knowledge*. Penguin Books, 1988:93-109
- FURLEY D. Zeno and invisible magnitudes. In: Mourelatos APD (ed) *The Pre-Socratics. A collection of critical essays*. Princeton University Press, 1993:353-367
- HEWIT P. *Οι έννοιες της Φυσικής*. Μετάφραση Ελένη Σηφάκη. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 1992, II:198-200
- MARR D. A Theory for cerebral neocortex. Proceedings of the Royal Society of London, Ser B, 176, 1970:161
- RUCKER R. *Infinity and the Mind. The Science and Philosophy of the Infinite*. Bantam Books, 1983:203-221
- LEWIS C. *Alice's Adventures in Wonderland and Through the Looking Glass*. MacMillan, 1971:146

8. NADIN M. The logic of vagueness. In: Freeman E (ed) *The relevance of Charles Peirce*. La Salle, IL, Monist Library of Philosophy, 1983:154–166, 623–668
 9. RUSSEL B. Vagueness. *Aust J Psychol Philosophy* 1923, 1:84–92
 10. BLACK M. Vagueness: An exercise in logical analysis. *Philosophy of Science* 1937, 4:427–455
 11. ZADEH L. Fuzzy sets. *Information and Control* 1965, 8:338–353
 12. ΚΡΙΚΕΛΗΣ Ι. *Φυσική Εξέταση και Διάγνωση*. Αθήνα, 1959:37
 13. FISCHBACK F. *A Manual of Laboratory and Diagnostic Tests*. 5th ed. Lippincott, 1996:383
 14. BOYKO EJ, ALDERMAN BW, BARON AE. Reference test errors bias. The evaluation of diagnostic tests for ischemic heart disease. *J Gen Intern Med* 1988, 3:476–481
 15. WALTER SD, IRWIG LM. Estimation of test error rates, disease prevalence and relative risk from misclassified data: A review. *J Clin Epidemiol* 1988, 41:923–938
 16. DENEFF P. Evaluating rapid tests for streptococcal pharyngitis: The apparent accuracy of a diagnostic test when there are errors in the standard of comparison. *Med Decis Making* 1987, 7:92–96
 17. HANKELMAN RM, KAY I, BRONSKILL MJ. Receiver operating characteristic (ROC) analysis without truth. *Med Decis Making* 1990, 10:24–29
 18. KLIR G. Measures and principles of uncertainty and information. Recent developments. In: Atmanspacher H, Scheingraber H (eds) *Information Dynamics*. New York, Plenum Press, 1991:1–14
 19. McNEILL D, FREIBERG P. *Fuzzy Logic. The Revolutionary Computer Technology that is Changing the World*. 2nd ed. New York, 1996, 35:217
 20. KOSKO B. *The Fuzzy Future*. Harmony Books, 1999:1–6
 21. BRAUNWALD E. Heart failure. In: *Harrison's Principles of Internal Medicine*. 15th ed. McGraw Hill Co, 2001:1318
 22. ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ. Απόσπασμα 30
 23. KOSKO B. *Fuzzy Thinking. The new Science of Fuzzy Logic*. Flamingo, 1993:24–34
 24. McNEILL D, FREIBERG P. *Fuzzy Logic. The Revolutionary Computer Technology that is Changing the World*. 2nd ed. Touchstone, New York, 1996:102
 25. KOSKO B. *Fuzzy Thinking. The new Science of Fuzzy Logic*. Flamingo, 1993:161–176
 26. *Harrison's Principles of Internal Medicine*. 15th ed. McGraw-Hill, 2001:211
 27. *ibid*:445
 28. MANDANI E, ASSILIAN S. An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies* 1975, 7:1–13
- Corresponding author:*
E. Anevllavis, 17 Antheon street, GR-151 25 Marousi, Athens, Greece