

ΣΥΜΠΟΣΙΟ
ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ
ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

SYMPOSIUM
NEW TECHNOLOGIES IN SERVICE
TO OUR KNOWLEDGE OF ANTIQUITY

Μοντελοποίηση και προσομοίωση του Μηχανισμού των Αντικυθήρων

ΜΑΝΟΣ ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής του Τμήματος Εφαρμοσμένης Πληροφορικής του
Πανεπιστημίου Μακεδονίας
E-mail: manos@uom.gr

Μοντελοποίηση και προσομοίωση του Μηχανισμού των Αντικυθήρων

ΜΑΝΟΣ ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗΣ

Περίληψη

Από την ημέρα της ανακάλυψης του, οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην μελέτη του Μηχανισμού των Αντικυθήρων. Από τις ραδιογραφίες του Δρα. Καρακάλου, μέχρι την μελέτη των συγχρόνων αξονικών τοπογραφιών, η καταπληκτική αυτή συσκευή έχει καταστεί πεδίο εφαρμογής πλείστων νέων τεχνολογιών. Η μοντελοποίηση και προσομοίωση με ηλεκτρονικό υπολογιστή ήταν μία από τις πρώτες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση και μελέτη του μηχανισμού, έχοντας ως παράλληλο αποτέλεσμα μια μεγάλη αύξηση του επιστημονικού ενδιαφέροντος για την λειτουργία του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι προσομοιώσεις και τα υπολογιστικά μοντέλα μπορούν γρήγορα και εύκολα να διαδοθούν μέσω του διαδικτύου. Ως εργαλείο επαλήθευσης, η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μιας σχεδίασης πριν να κατασκευασθεί στην πράξη η μηχανή, ή για την ανάλυση μιας υπάρχουσας μηχανής. Στην περίπτωση του Μηχανισμού των Αντικυθήρων αντιμετωπίζουμε ένα απολύτως αιτιοκρατικό σύστημα, η λειτουργία του οποίου δεν είναι γνωστή στην εντέλεια, προερχόμενη μόνο από τα μέρη του μηχανισμού που έχουν ανευρεθεί και μελετηθεί. Επειδή πολλοί επιστήμονες θεωρούν ότι η συσκευή είναι ο πρώτος φορητός υπολογιστής που κατασκευάστηκε ποτέ, είναι απολύτως κατάλληλο να χρησιμοποιήσου- με προσομοίωση σε έναν σύγχρονο υπολογιστή για να επικυρώσουμε τη λειτουργική περιγραφή της μηχανής, αλλά και για να εκτιμήσουμε την πιθανή λειτουργία των τμημάτων που λείπουν. Από τον εντοπισμό σφαλμάτων στα σχέδια του Derek de Solla Price, την κατανόηση του τρόπου υλοποίησης των παρατηρήσεων του Ιπάρχου για την τροχιά της Σελήνης, μέχρι και τον ακριβή υπολογισμό των ανοχών που απαιτούνται για την κατασκευή ενός φυσικού μοντέλου, η προσομοίωση του μηχανισμού έχει αποδειχθεί πολύτιμη. Η προσομοίωση με ηλεκτρονικό υπολογιστή έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της ταχύτερης επαλήθευσης μιας πλειάδας υποθέσεων, όπως στην περίπτωση ενός μέχρι σήμερα μη πλήρως αναγνωρισμένου θραύσματος, το οποίο μπορεί να αποτελούσε μέρος ενός ουρανού θόλου παρατήρησης. Συγκρινόμενη με τα φυσικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για επίδειξη, ένα μοντέλο προσομοίωσης μπορεί εύκολα να βαθμονομηθεί σε ακριβείς ημερομηνίες με την υπολογισμένη «περιστροφή» των γραναζιών του μηχανισμού στην απαιτούμενη χρονική στιγμή. Τότε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό αστρικών φαινομένων σύμφωνα με την αρχική σχεδίαση του μηχανισμού, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων ρυθμίσεων.

Νέες Τεχνολογίες στην Υπηρεσία της Αρχαιογνωστικής Έρευνας
14 Δεκεμβρίου 2013
Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

1. Εισαγωγή

Τα πρώτα μοντέλα του Μηχανισμού των Αντικυθήρων που κατασκευάστηκαν ποτέ, ήταν φυσικά μοντέλα και κατασκευάστηκαν με βάση τις ανακαλύψεις του Derek de Solla Price. Ο Derek de Solla Price μελέτησε τον Μηχανισμό των Αντικυθήρων για 25 χρόνια, κατά τη διάρκεια των οποίων δημοσίευσε τα περίφημα άρθρα του το 1959 [4] και το 1974 [5]. Αν και πολλοί ερευνητές πριν από τον Price παρουσίασαν υποθέσεις για τον μηχανισμό, ήταν ο Price που κατάφερε με επιμέλεια και επιμονή να μετρήσει τα δοντάκια κάθε γιρανιού βασιζόμενος στις ραδιογραφίες του δρ. Καρακάλλου, και να δώσει την πρώτη λεπτομερή περιγραφή της λειτουργίας του μηχανισμού. Σήμερα, με βάση τις νεώτερες ανακαλύψεις του Έργου του Μηχανισμού των Αντικυθήρων [2], γνωρίζουμε ότι κάποιες από τις εικασίες του, όπως το διαφορικό σύμπλεγμα, είναι ανακριβείς. Παρόλα αυτά, ο Price έβαλε τα στερεά θεμέλια πάνω στα οποία βασίσθηκε οποιαδήποτε μετέπειτα έρευνα στον μηχανισμό.

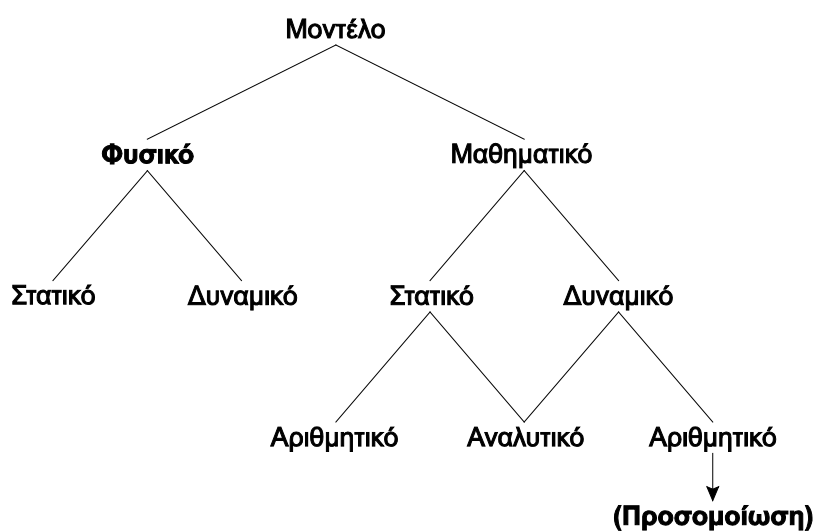
Ο Price φαίνεται στο Σχήμα 1 αριστερά μαζί με το φυσικό μοντέλο που κατασκεύασε. Ούτε το δικό του μοντέλο, ούτε τα περισσότερα μοντέλα που κατασκευάστηκαν από τότε λειτουργεί άψογα. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι οι εδράσεις των αξόνων των γιρανιών δεν μπορούν να αναγνωρισθούν ευκρινώς στα ραδιογραφήματα ή στις αξονικές τομογραφίες. Ως επακόλουθο, και για να είναι δυνατόν να επιδειχθούν καλύτερα τα εσωτερικά γιρανιά, οι περισσότερες ανακατασκευές χάνουν τις πλάκες στήριξης λιγότερο στιβαρές από όσο θα έπρεπε [1]. Η μόνη, μέχρι σήμερα, φυσική ανακατασκευή που λειτουργεί άψογα είναι αυτή που κατασκευάστηκε από τον Michael Wright [11], αλλά αυτή απομακρύνεται λίγο από την αρχική σχεδίαση προσθέτοντας μερικές ακόμη πλάκες. Το μοντέλο του Wright φαίνεται στο Σχήμα 1 στα δεξιά. Άλλα πιο πρόσφατα λειτουργικά φυσικά μοντέλα επιδεικνύουν μόνο τις λειτουργίες του μηχανισμού χωρίς να αποτελούν ακριβείς ανακατασκευές.



Σχήμα 1: Φυσικά μοντέλα του μηχανισμού, του Price (αριστερά) και του Wright (δεξιά).

Αν και φυσικά μοντέλα κατασκευάστηκαν σχετικά νωρίς κατά τη μελέτη του μηχανισμού, τα μοντέλα προσομοίωσης έπρεπε να περιμένουν την εξέλιξη τόσο του υλικού όσο και των εργαλείων λογισμικού πριν αρχίσουν να εμφανίζονται. Η πρώτη προσομοίωση με υπολογιστή αναπτύχθηκε από τον Robert Morris [3], ο οποίος χρησιμοποίησε έναν μεταγλωττιστή λογικών διαγραμμάτων για να δημιουργήσει μια έκδοση κινουμένων σχεδίων των γραναζιών του μηχανισμού για ένα σύστημα διανυσματικών γραφικών. Το μοντέλο αυτό ήταν καθαρά πειραματικό και όχι μια πραγματική προσομοίωση του μηχανισμού, επειδή την εποχή της ανάπτυξής του (γύρω στο 1980), τα γραφικά τερματικά δεν ήταν ευρέως διαθέσιμα.

Το παρόν άρθρο εξετάζει την ακριβή μοντελοποίηση, προσομοιώσεις και εμψυχώσεις (animations) του Μηχανισμού των Αντικυθήρων. Η μελέτη που παρουσιάζεται λαμβάνει υπ όψιν της τον σκοπό, το εύρος, την διαθεσιμότητα, και την προσβασιμότητα των μοντέλων, για να αποδείξει ότι οι προσομοιώσεις παρέχουν ένα πολύτιμο εργαλείο στην κατανόηση της λειτουργίας του μηχανισμού καθώς και την διάχυση των αποτελεσμάτων της έρευνας.



Σχήμα 2: Ταξινόμηση των μοντέλων.

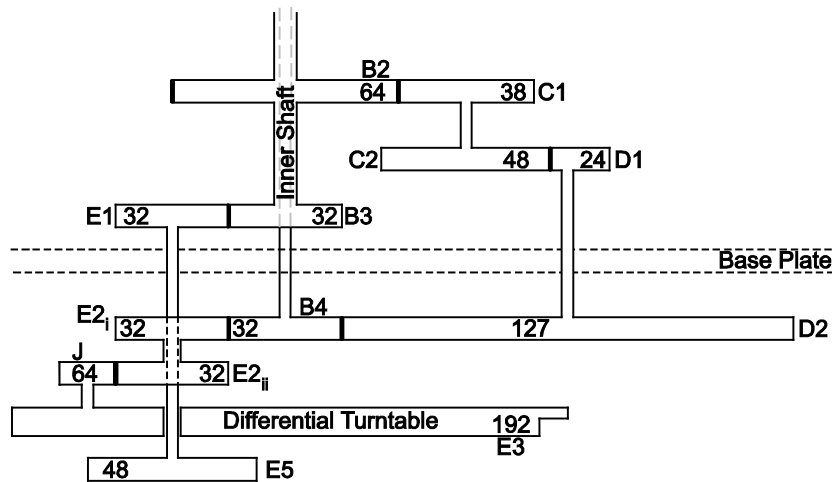
1.1. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση

Η μοντελοποίηση αναφέρεται στην δημιουργία μιας αναπαράστασης ενός συστήματος ή φαινομένου. Μπορεί ακόμη να αναφέρεται στην ολότητα της πληροφορίας που έχουμε συγκεντρώσει για την μελέτη ενός συστήματος. Τα μοντέλα είναι είτε φυσικά είτε μαθηματικά και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την ταξινόμηση που δίνεται στο Σχήμα 2 [7]. Τόσο τα φυσικά όσο και τα μαθηματικά μοντέλα υποδιαιρούνται σε στατικά και δυναμικά ανάλογα με το αν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ή όχι. Κατόπιν, τα μαθηματικά μοντέλα υποδιαιρούνται περαιτέρω σε αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι αναλυτικών εξισώσεων που να τα περιγράφουν. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, η προσομοίωση χρησιμοποιείται κυρίως για αριθμητικά, δυναμικά, μαθηματικά μοντέλα.

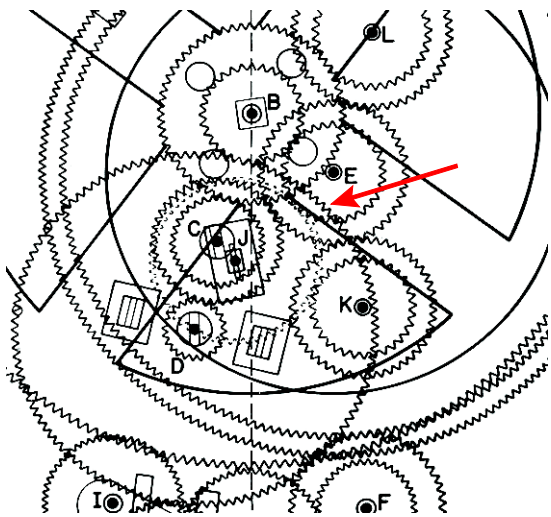
Με βάση αυτή των ταξινόμηση μοντέλων, θα ήταν ίσως πιο κατάλληλο να κατασκευάσουμε ένα φυσικό μοντέλο για ένα αιτιοκρατικό μηχανικό σύστημα όπως ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων, παρά μια προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Παρόλα αυτά, η παραπάνω ταξινόμηση αναφέρεται μόνο στην ανάλυση ή σύνθεση ενός συστήματος και όχι σε άλλες χρήσεις των μοντέλων,

όπως η εκπαίδευση, όπου χρησιμοποιούνται για να επιδείξουν τις πολύπλοκες λειτουργίες ενός συστήματος διαμέσου απ ευθείας οπτικοποίησης. Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο συχνά βλέπουμε κινούμενα σχέδια και μοντέλα προσομοίωσης από κινητήρες, μηχανές, και συσκευές.

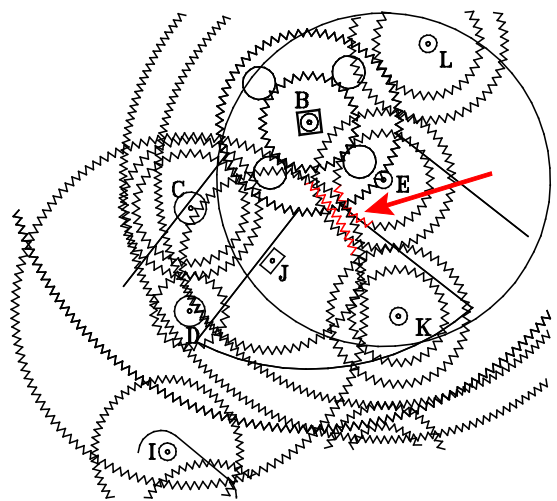
Επιπλέον, όπως θα αποδειχθεί στις επόμενες παραγράφους, εκτός από την προφανή εκπαιδευτική της αξία, η προσομοίωση του Μηχανισμού των Αντικυθήρων με ηλεκτρονικό υπολογιστή έχει συνεισφέρει σημαντικά στην επικύρωση των μαθηματικών μοντέλων και υποθέσεων, τον εντοπισμό σφαλμάτων στις φυσικές σχεδιάσεις, και την επαλήθευση των λειτουργικών περιγραφών.



(α)



(β)



(γ)

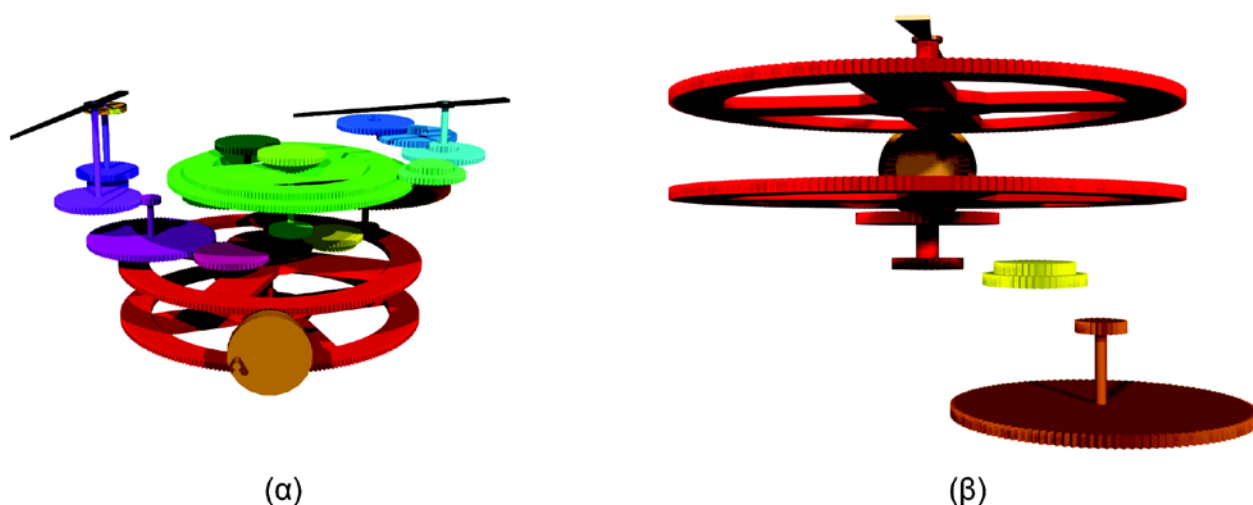
Σχήμα 3: Επανυπολογισμός των θέσεων των γραναζιών του Price.

- (α) Μέρος του σχεδίου διατομής,
- (β) Μέρος του διαγράμματος όψεως του Price,
- (γ) Επανατοποθέτηση των γραναζιών.

2. Επαλήθευση των συμπερασμάτων του Price

Η λειτουργική περιγραφή του Μηχανισμού των Αντικυθήρων όπως εξήχθη από την μελέτη του de Solla Price περιελάμβανε λεπτομερή σχέδια του μηχανισμού. Για την επαλήθευση αυτών των σχεδίων και για να οπτικοποιήσουμε την λειτουργία του μηχανισμού, προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε το πρώτο πλήρως λειτουργικό μοντέλο υπολογιστή του μηχανισμού. Η μετατροπή των σχημάτων σε σχεδίαση υποβοηθούμενη από υπολογιστή (CAD) απεκάλυψε ένα σφάλμα στα σχέδια, όπως φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 3.

Το επάνω σχεδιάγραμμα (Σχήμα 3(α)) είναι μέρος του διαγράμματος τομής όπως δόθηκε από τον Morris στο [3]. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, το γρανάζι E2i εμπλέκει το γρανάζι B4, το



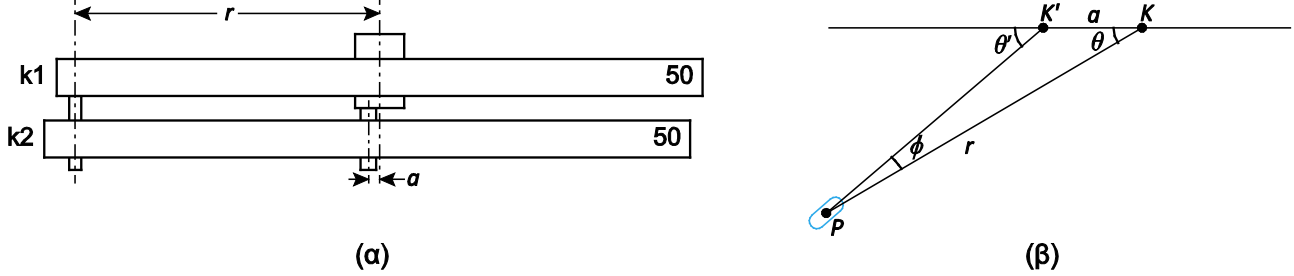
Σχήμα 4: Δύο πλαίσια των αρχικών κινουμένων εικόνων. (α) Ένα πλαίσιο που δείχνει το διαφορεικό γρανάζι στο πάνω μέρος. (β) Ένα πλαίσιο που δείχνει την συναρμολόγηση του μηχανισμού με τα γρανάζια να τοποθετούνται στη σωστή τους θέση.

οποίο εμπλέκει το γρανάζι D2. Επομένως, τα γρανάζια E2i, B4, και D2 είναι στο ίδιο επίπεδο. Όμως, στο διάγραμμα όψεως που φαίνεται στο Σχήμα 3(β), τα γρανάζια E2i και D2 επικαλύπτονται στο σημείο που υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος. Καθώς αυτό δεν είναι δυνατόν, η σχεδίαση διορθώθηκε για το μοντέλο προσομοίωσης με υπολογιστή, μεταβάλλοντας ελαφρά την θέση των αξόνων των γραναζιών. Στο τελικό μοντέλο, τα γρανάζια έχουν αρκετό ελεύθερο διάκενο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3(γ) με το κόκκινο βέλος και τα κόκκινα δόντια των γραναζιών.

Με βάση τα τροποποιημένα διαγράμματα, δημιουργήθηκαν από υπολογιστή τα πρώτα κινούμενα σχέδια του μηχανισμού το 1998 [9] και δημοσιεύθηκαν σε ένα πολυμεσικό CD [8]. Οι κινούμενες αυτές εικόνες (animations) χρησιμοποιούσαν ψευδοχρώματα για τα γρανάζια, έτσι ώστε η λειτουργία του μηχανισμού να γίνει πιο κατανοητή. Δύο πλαίσια αυτών των κινουμένων εικόνων δίνονται στο Σχήμα 4.

Εκτός της στατικής αναπαράστασης των διαστάσεων του μοντέλου, τα μοντέλα προσομοίωσης του Μηχανισμού των Αντικυθήρων με υπολογιστή απαιτούν τον ακριβή προσδιορισμό είτε των εξισώσεων περιστροφής για τα διάφορα μέρη (κυρίως γρανάζια) ή την παραγωγή δεδομένων μετατόπισης κάθε κινουμένου μέρους με μεγάλη ακρίβεια. Καθώς αυτές οι προ-διαγραφές βασίζονται σε φυσικές μετρήσεις του μηχανισμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε την μοντελοποίηση προσομοίωσης της σειράς γραναζιών του Ιπάρχου [2]. Η περιστροφή του γραναζιού k1 (αυτού που φέρει τον πίρο)

μπορεί να μοντελοποιηθεί απλώς με τη σχετική περιστροφή των γραναζιών που οδηγούν το k1. Η



Σχήμα 5: Υπολογισμός της σχετικής γωνίας του γραναζιού του Ιππάρχου με την σχισμή.

περιστροφή όμως του γραναζιού k2 είναι μάλλον πολύπλοκη. Ο καλύτερος τρόπος να την μοντελοποιήσουμε για την προσομοίωση είναι να υπολογίσουμε την γωνία περιστροφής του γραναζιού k2 σε σχέση με την γωνία περιστροφής του γραναζιού k1. Στο Σχήμα 5 φαίνεται το διάγραμμα τομής των γραναζιών k1 και k2 (Σχήμα 5(α)) και ο υπολογισμός της γωνίας θ' ως συνάρτηση της γωνίας θ

Για το τρίγωνο που φαίνεται στο Σχήμα 5(β), K είναι το κέντρο του γραναζιού k1, K' είναι το κέντρο του γραναζιού k2, και P είναι ο πύρος που είναι προσαρμοσμένος στο γρανάτζι k1. Επομένως, οι πλευρές KK' και KP του τριγώνου έχουν σταθερό μήκος (a και r αντιστοίχως), ενώ η πλευρά K'P είναι μεταβλητή, εξαρτώμενη από τη θέση του πύρου μέσα στη σχισμή. Ο νόμος του ημιτόνου καθορίζει ότι:

$$\frac{r}{\sin(180 - \theta')} = \frac{a}{\sin\phi} \Rightarrow \sin\phi = \frac{a}{r} \sin(180 - \theta') = \frac{a}{r} \sin(180 - \theta - \phi),$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο του αθροίσματος γωνιών

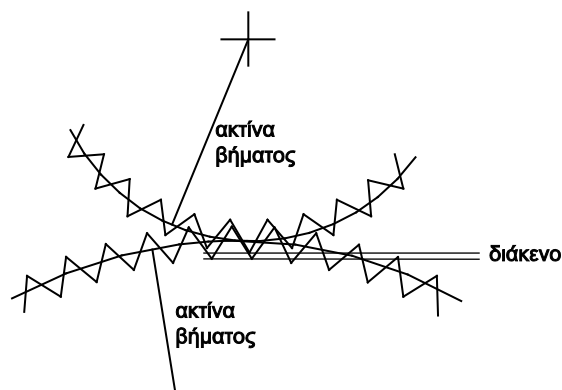
$$\sin\phi \left(1 + \frac{a}{r} \cos(180 - \theta) \right) = \frac{a}{r} \sin(180 - \theta) \cos\phi$$

και θέτοντας

$$x = 1 + \frac{a}{r} \cos(180 - \theta), \text{ και } y = \frac{a}{r} \sin(180 - \theta)$$

παίρνουμε

$$\sin^2\phi x^2 = y^2(1 - \sin^2\phi),$$



Σχήμα 6: Παράμετροι των γραναζιών.

από το οποίο παίρνουμε τελικά

$$\sin\phi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \text{ ή } \phi = \arcsin\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right),$$

Επειδή $\theta' = \theta + \phi$ η σχέση της θ' με την θ είναι

$$\theta' = \theta + \arcsin\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right).$$

Επομένως, κατά την προσομοίωση της περιστροφής των διαφόρων γραναζιών, η θέση του γραναζιού k2, που ορίζεται από την γωνία θ' μπορεί να υπολογισθεί από την θέση του γραναζιού k1 που ορίζεται από την γωνία θ .

Μια άλλη χρήση της μοντελοποίησης προσομοίωσης για την επαλήθευση της λειτουργίας του μηχανισμού είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων των γραναζιών. Τόσο οι παλιές ραδιογραφίες, όσο και οι σύγχρονες αξονικές τομογραφίες έδειξαν ότι τα δοντάκια των γραναζιών του Μηχανισμού των Αντικυθήρων είναι τριγωνικά. Αυτή η γεωμετρία των δοντιών είναι ευκολότερη στην κατασκευή, ειδικά με τα εργαλεία που ήταν διαθέσιμα εκείνη την εποχή, αλλά η λιγότερο κατάλληλη για ομαλή εμπλοκή. Ο λόγος φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 6. Αν η απόσταση των κέντρων των γραναζιών είναι τέτοια ώστε η κορυφή ενός δοντιού να πέφτει πολύ κοντά στην κοιλάδα ανάμεσα στα δόντια, τότε τα γρανάζια δεν μπορούν να περιστραφούν γιατί ο κορυφή χτυπάει επάνω στην πλευρά του απέναντι δοντιού.

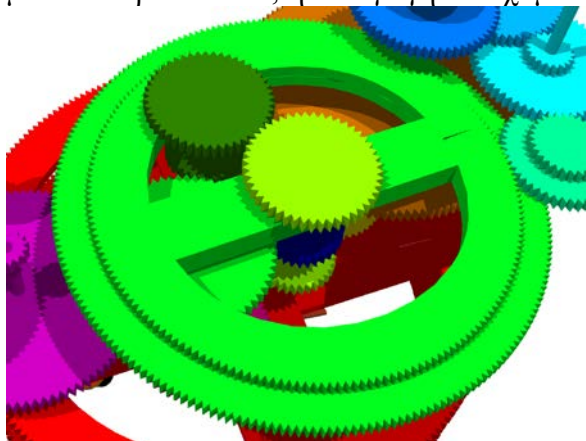
Ανάλογα την πραγματική εσωτερική (στις κοιλάδες) και εξωτερική (στις κορυφές των δοντιών) διαμέτρους των γραναζιών, αυτό που χρειάζεται να υπολογισθεί είναι η ακτίνα βήματος κάθε γραναζιού. Η ακτίνα βήματος ορίζεται ως η ακτίνα στην οποία δύο κύλινδροι θα κυλίσονταν ο ένα πάνω στον άλλο, αν τα γρανάζια είχαν αντικατασταθεί από εφραπτόμενους κυλίνδρους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κύλινδροι δεν μπορούν να ολισθαίνουν καθόλου, ο λόγος βήματος είναι ίσος με το λόγο των γραναζιών, ο οποίο φυσικά είναι ίσος με τον λόγο του αριθμού των δοντιών τους. Επομένως, μία από τις ακτίνες βήματος, η άλλη εξάγεται απ ευθείας. Αν το διάκενο, που ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στην κορυφή ενός δοντιού από την κοιλάδα που είναι απέναντι, είναι μικρό, η περιστροφή δεν είναι δυνατή όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Αν το διάκενο είναι πολύ μεγάλο, τότε είναι ανεπαρκής η ροπή που μεταφέρεται ανάμεσα στα γρανάζια, έχοντας ως αποτέλεσμα την δύσκολη ή αδύνατη λειτουργία μια μεγάλης αλυσίδας γραναζιών. Αυτός είναι πιθανότατα ο λόγος, για τον οποίο τα περισσότερα από τα φυσικά μοντέλα που είναι ακριβείς ανακατασκευές του Μηχανισμού των Αντικυθήρων δεν λειτουργούν ομαλά ή ακόμη και καθόλου. Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα προσομοίωσης με υπολογιστή μπορούν να λειτουργούν ομαλά λόγω του ακριβούς υπολογισμού του διακένου ανάμεσα σε κάθε ζεύγος εμπλεκόμενων γραναζιών.

Οι αξονικές τομογραφίες που έγιναν από το ερευνητικό έργο του Μηχανισμού των Αντικυθήρων αντέκρουσαν την ιδέα του Price για το διαφορικό γρανάζι. Εκτός του ότι ήταν μια πολύ πολύπλοκη αλυσίδα γραναζιών για μια σχετικά απλή εξαγωγή της περιστροφής της σελήνης, δεν είχε λάβει υπόψη της τη σχισμή στο γρανάζι K2 και το γεγονός ότι ένα τόσο μεγάλο γρανάζι όπως το E3 θα έπρεπε να περιστρέφεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, απαιτώντας υπερβολική δύναμη στην κορώνα οδήγησης. Οι αξονικές τομογραφίες αποκάλυψαν ότι η πολύπλοκη αλυσίδα γραναζιών που υποτίθεται ότι οδηγούσε το διαφορικό γρανάζι μοντελοποιεί στην πραγματικότητα τις σεληνιακές ανω-

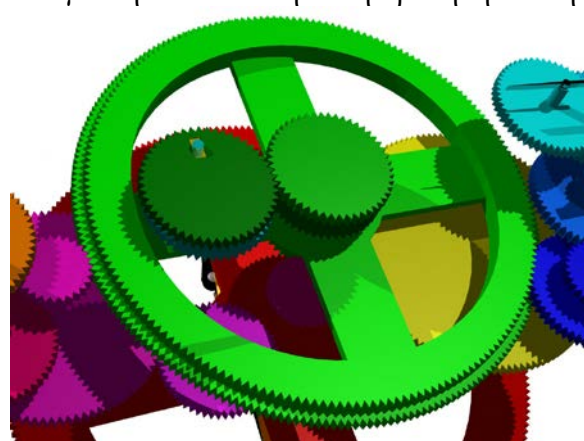
μαλίες που υπολόγισε ο Ίππαρχος. Μα βάση τα δεδομένα αυτά, η μοντελοποίηση με ηλεκτρονικό υπολογιστή προσαρμόστηκε εύκολα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.

3. Μοντελοποίηση για Έλεγχο Υποθέσεων

Επειδή ο κύριος λόγος ανάπτυξης των προσομοιώσεων και κινουμένων εικόνων του Μηχανισμού των Αντικυθήρων ήταν η επικύρωση και επαλήθευση των μετρήσεων που έγιναν είτε από τον de Solla Price είτε τη πιο πρόσφατη έρευνα, προσπαθήσαμε να αποφύγουμε την συμπερίληψη οποιωνδήποτε χαμένων τμημάτων του μηχανισμού. Αυτό ήταν πάντοτε δυνατόν να επιτευχθεί, επειδή η λειτουργία ορισμένων μερών δεν μπορεί να επιδειχθεί χωρίς τη διασύνδεσή τους με άλλα τμήματα. Παρόλα αυτά, η εισαγωγή των χαμένων τμημάτων για τη διασύνδεση αυτή κρατήθηκε στην



(α)



(β)

Σχήμα 7: Αντικατάσταση του διαφορικού γραναζιού. (α) Το διαφορικό γρανάτζι του Price (β) Τα γρανάτζια του Ιπάρχου στο νέο μοντέλο.

απλούστερη δυνατή μορφή για δύο λόγους: α) ο μηχανισμός είναι πολύ περίτεχνος και καλαίσθητος, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο τεχνίτης που τον κατασκεύασε θα ακολουθούσε την απλούστερη δυνατή λύση για κάθε πρόβλημα σχεδίασης που αντιμετώπιζε, β) μια πολύπλοκη λύση μπορεί αναπόφευκτα να περιελάμβανε κάποια γνώση μηχανικής που δεν ήταν διαθέσιμη κατά την εποχή της ανάπτυξης του μηχανισμού.

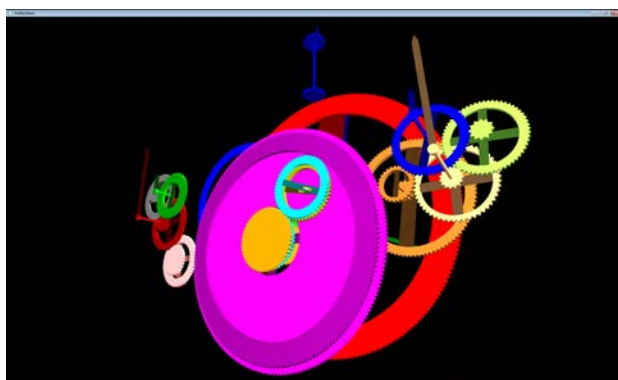
Αυτή η επιμονή στην απλοποίηση των χαμένων τμημάτων μας ανάγκασε να περιλάβουμε μικρές ανακρίβειες στην απόδοση της προσομοίωσης, αντί να περιλάβουμε πολύπλοκες αλυσίδες γραναζιών. Το γεγονός αυτό φαίνεται καθαρά από την απόδοση της προσαρμογής του δείκτη της σελήνης στον άξονά του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Μόνο η κορώνα που φαίνεται στο σχήμα έχει αναγνωρισθεί στα υπάρχοντα θραύσματα του μηχανισμού. Το μικρό γρανάτζι στον άξονα του δείκτη του ηλίου δεν έχει βρεθεί. Το πρόβλημα είναι ότι η κορώνα στην πραγματικότητα είναι στραμμένη προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό θα απαιτούσε την συμπερίληψη τουλάχιστον 3 ακόμη γραναζιών και ενός υποπλαισίου που να τα υποστηρίζει, για να μετατραπεί η οριζόντια περιστροφή των δύο δειχτών σε σχετικά κατακόρυφη περιστροφή του σφαιριδίου της σελήνης, το οποίο απεικονίζει τις φάσεις της σελήνης.

Η λύση που περιλαμβάνεται στα μοντέλα προσομοίωσης είναι εξαιρετικά απλή και κομψή, ακολουθώντας την φιλοσοφία του μηχανισμού, ακόμη και αν δεν αντιστοιχεί στα διαθέσιμα θραύσματα του μηχανισμού.

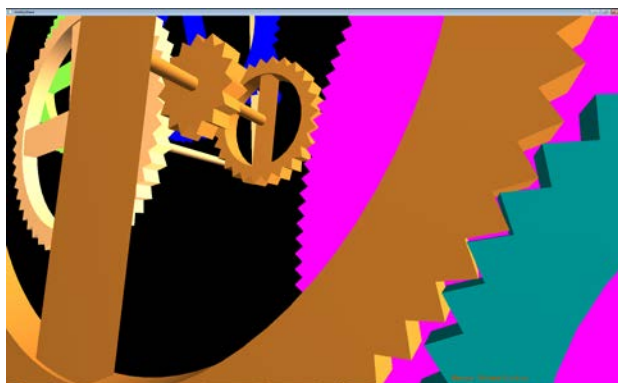


Σχήμα 8: Απόδοση της προσαρμογής του δείκτη της σελήνης.

4. Προσομοιώσεις για λεπτομερή μελέτη και επαλήθευση της λειτουργίας



(α)



(β)

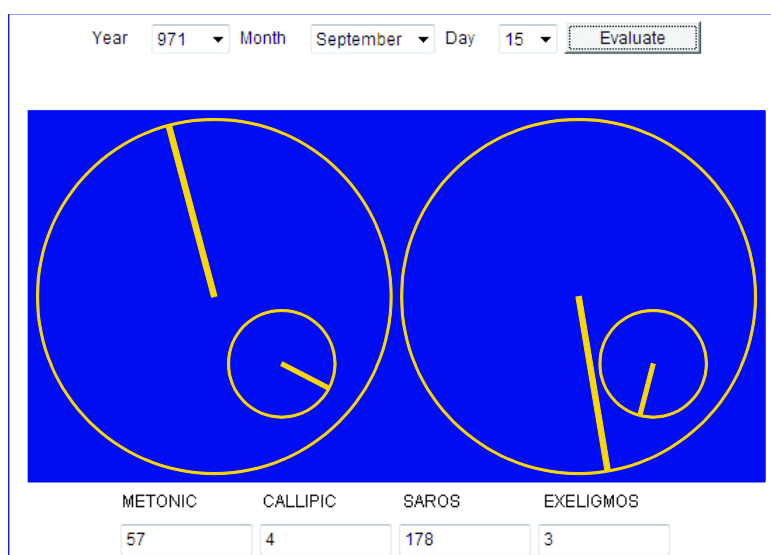
Σχήμα 9: Προσομοίωση του μηχανισμού. (α) Πίσω όψη, όπου φαίνονται τα γρανάζια του Ιππάρχου. (β) «ζουμάρισμα» για έλεγχο του διακένου των γραναζιών

Η μοντελοποίηση του Μηχανισμού των Αντικυθήρων που παρουσιάστηκε μέχρι τώρα παρήγαγε μια σειρά κινουμένων εικόνων (animations, που επιδεικνύουν την λειτουργία του μηχανισμού με διαφόρους τρόπους. Για μια πιο επακριβή μελέτη της λειτουργίας, όμως, αναπτύχθηκαν ορισμένες αλληλεπιδραστικές προσομοιώσεις. Το πρώτο σύνολο προσομοιώσεων δίνει στον χρήστη πλήρη έλεγχο του μοντέλου, έτσι ώστε να μπορεί αυτός να «εισέλθει» εντός του μηχανισμού, καθώς και να περιστρέψει και να μετακινήσει το μοντέλο, έτσι ώστε να το εξετάσει από κάθε δυνατή οπτική γωνία. Καθώς το μοντέλο περιγράφεται διανυσματικά, η λεπτομέρεια δεν χάνεται ανεξάρτητα από την απόσταση θέασης. Επομένως, μπορεί να εξετάσει κανείς μικρές λεπτομέρειες των γραναζιών, για να προσδιορίσει την ακριβή εμπλοκή τους, τυχόν ασυμφωνίες στην κίνησή τους ή τυχόν προβλήματα με την απόδοση. Σε οποιαδήποτε θέση θέασης, ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει την περιστροφή της κορώνας, βάζοντας έτσι τον μηχανισμό σε κίνηση και παρατηρώντας την λειτουργία του. Οι προσομοιώσεις του Μηχανισμού των Αντικυθήρων είναι ανεβασμένες στην ίδια ιστοσελίδα με τις κινούμενες εικόνες [9], με δυνατότητα ελεύθερης πρόσβασης. Δύο πλαίσια της προσομοίωσης φαίνονται στο Σχήμα 10.

Εκτός από την προφανή αξία τους για επιστημονική έρευνα, οι προσομοιώσεις αποτελούν επίσης ένα εκπαιδευτικό εργαλείο για την επίδειξη της λειτουργίας του μηχανισμού σε μουσεία και εκδόσεις. Για παράδειγμα, οι προσομοιώσεις του μηχανισμού έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια έκθεση με

τον τίτλο "Gods, Myths, and Mortals: Discover Ancient Greece" που φιλοξενήθηκε από το Children's Museum of Manhattan το 2007-2008, αλλά και σε πολλές άλλες. επίσης, μια σύνθετη εικόνα των κινουμένων σχεδίων εμφανίστηκε στο εξώφυλλο του engine [10], ενός περιοδικού για την διδασκαλία Αγγλικών σε Γερμανούς μηχανικούς!

Όσο ακριβείς και να είναι οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ακριβείας των υπολογισμών του μηχανισμού σε μακρόχρονες περιόδους. Για τον λόγο αυτό, κατασκευάστηκε ένα πιο αφηρημένο μοντέλο προσομοίωσης του μηχανισμού, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον γρήγορη «λειτουργία» του μηχανισμού μέχρι να φθάσει σε μια συγκεκριμένη ημερομηνία. Ο χρήστης εισάγει την ημερομηνία αυτή και ο προσομοιωτής υπολογίζει την θέση των τεσσάρων κύκλων που υπολογίζονται από τον μηχανισμό των Αντικυθήρων, και συγκεκριμένα τον Μετωνικό και Καλλιπικό κύκλους, τον κύκλο Σάρως, και τον Εξελιγμό. Ο υπολογισμός δεν γίνεται με την επίλυση εξισώσεων, αλλά με την «περιστροφή» των γραναζιών του μηχανισμού όσες φορές απαιτείται για να φθάσει αυτός στην ημερομηνία που έχει προσδιορισθεί από τον χρήστη. Κατόπιν «διαβάζονται» οι οπίσθιες διαβαθμισμένες πλάκες του μηχανισμού. Ένας τέτοιος προσομοιωμένος υπολογισμός δίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Προσομοίωση για τον υπολογισμό των διαφόρων κύκλων.

5. Συμπεράσματα

Το άρθρο αυτό κατέδειξε πως η μοντελοποίηση και προσομοίωση με ηλεκτρονικό υπολογιστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και επικύρωση αρχαίων αντικειμένων, και συγκεκριμένα, του Μηχανισμού των Αντικυθήρων. Η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επαληθεύσει τις εκτιμηθείσες παραμέτρους του μηχανισμού και να επικυρώσει διάφορες υποθέσεις για την σχεδίαση του μηχανισμού. Συγκρινόμενη με την κατασκευή φυσικών μοντέλων, η μοντελοποίηση με υπολογιστή έχει το σαφές πλεονέκτημα της ταχείας και ακριβούς εκτίμησης μιας λειτουργικής περιγραφής. Επιπλέον, τα μοντέλα προσομοίωσης με υπολογιστή, έχοντας τη δυνατότητα της διανομής μέσω του διαδικτύου, προσφέρουν ευρεία ενημέρωση, αυξάνοντας σημαντικά την εκτίμηση της Αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας. Τέλος, η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομοίωση συγκεκριμένων πλευρών της λειτουργίας του μηχανισμού, δίνοντάς μας την δυνατότητα να τον «χρησιμοποιούμε» ακόμη και σήμερα.

Αναφορές

- [1] K. Efstathiou, A. Basiakoulis, M. Efstathiou, M. Anastasiou, J.H. Seiradakis, "Determination of the gears geometrical parameters necessary for the construction of an operational model of the Antikythera Mechanism," Mechanism and Machine Theory, Volume 52, June 2012, Pages 219-231.
- [2] T. Freeth, Y. Bitsakis, X. Moussas, J. Seiradakis, A. Tselikas, H. Mangou, M. Zafeiropoulou, R. Hadland, D. Bate, A. Ramsey, M. Allen, A. Crawley, P. Hockley, T. Malzbender, D. Gelb, W. Ambrisco, and M. Edmunds, "Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism," Nature, Vol. 444, No 11, November 2006, pp. 587-591.
- [3] R.I. Morris, "Derek de Solla Price and the Antikythera Mechanism: an Appreciation," IEEE Micro, Vol. 4, No 1, February 1984, pp. 15-21.
- [4] D. de Solla Price, "An ancient Greek computer," Scientific American, Vol. 201, June 1959, pp.60-67.
- [5] D. de Solla Price, "Gears from the Greeks: The Antikythera Mechanism - A Calendar Computer from ca. 80 B," Transactions of the American Philosophical Society, Vol. 64, Part 7 (new series), Nov. 1974.
- [6] D. de Solla Price, "The Productivity of Research Scientists," 1975 Yearbook of Science and the Future, Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1975, pp. 409-421.
- [7] Μ. Ρουμελιώτης, Σ. Σουραβλάς, Τεχνικές Προσομοίωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 2012.
- [8] M. Roumeliotis, Antikythera mechanism, Multimedia CD (in Greek, English and German), Technology Museum of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 2000.
- [9] M. Roumeliotis, "Simulation and Animation of the Antikythera Mechanism," Web 2012<<http://www.etl.uom.gr/mr/index.php?mypage=antikythera>>.
- [10] W. Rybczynski, "A Greek Time Machine," Engine, March 2005, pp. 58-61.
- [11] M.T. Wright, A.G. Bromley, "Current Work on the Antikythera Mechanism," Proceedings of the Conf. Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία, Thessaloniki, 4-7 September 1997, pp. 19-25.

