



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης
Δ.Π.Μ.Σ. Τεχνοοικονομικά Συστήματα

Επιλογή κατάλληλου υλικού καθαρισμού των μαρμάρων
της Εθνικής Βιβλιοθήκης, χρησιμοποιώντας τις
μεθόδους ELECTRE I με και χωρίς veto και PROMETHEE.

**Πολυκριτηριακά
Συστήματα
Υποστήριξης
Αποφάσεων**

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

Υπεύθυνοι Καθηγητές:
Δούκας, Χ.
Ξυδώνας, Π.
Ψαρράς, Γ.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



Αντικείμενο

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η επιλογή κατάλληλου υλικού καθαρισμού των μαρμάρων της Εθνικής Βιβλιοθήκης. Η επιλογή θα πρέπει να βασίζεται στους κανόνες συμβατότητας των υλικών, σύμφωνα με τη θεωρία περί προστασίας της Πολιτιστικής Κληρονομιάς, καθώς το κτίριο αποτελεί μνημείο.

Προβληματική: τύπου α – επιλογή (choice).

Εφαρμογή 3 μεθόδων:

- A. ELECTRE I χωρίς veto
- B. ELECTRE I με veto
- Γ. PROMETHEE*

**Η PROMETHEE, αντίθετα με την ELECTRE I, κάνει κατάταξη και όχι επιλογή, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επιλέγοντας την εναλλακτική που κατατάσσει ως καλύτερη.*



Αναγκαιότητα Επέμβασης Καθαρισμού

- Αισθητικοί λόγοι (χρωματική αλλοίωση λόγω φυσικής φθοράς ή/ και φθοράς από παλαιότερες επεμβάσεις).
- Φυσικοί / φυσικοχημικοί λόγοι (απομάκρυνση παραγόντων διάβρωσης και αλλοίωσης του υλικού).
- Ενεργειακή αναβάθμιση της φθαρμένης επιφάνειας με τη μικρότερη δυνατή τραχύτητα.
- Ανάδειξη καλλιτεχνικής αξίας της επιφάνειας.

Συμβατότητα Υλικών Αποκατάστασης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς



Η πλήρης αντιστρεψιμότητα, δηλαδή ο σχεδιασμός μια επέμβασης αποκατάστασης, ώστε αυτή να μπορεί να αφαιρεθεί πλήρως, στην πράξη δύσκολα επιτυγχάνεται. Έτσι, η συμβατότητα των υλικών λαμβάνεται υπόψη, ώστε ακόμα και να μην μπορεί να αφαιρεθεί πλήρως η επέμβαση, να μην προξενήσει τουλάχιστον περεταίρω φθορά στο αυθεντικό υλικό. Αναλυτικότερα, η συμβατότητα μπορεί να αφορά διάφορους παράγοντες όπως η χημική σύσταση, ο συντελεστής θερμικής διαστολής (επιδιώκονται όσο το δυνατόν παρόμοιες τιμές, ώστε κατά την διάρκεια θερμικών κύκλων να μη παρατηρείται ανομοιογένεια στην διαστολή και συνεπώς συνεπαγόμενη ανάπτυξη τάσεων), η πυκνότητα (επιδιώκονται παρόμοιες τιμές ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση) κ.ά. και καθορίζεται κάθε φορά ανάλογα με την επιθυμητή συμπεριφορά των υλικών. Η ασυμβατότητα των υλικών είναι δυνατόν να οδηγήσει στην αστοχία τους, στην μείωση της διάρκειας ζωής τους, ή στην εκλεκτική ένταση της φθοράς σε ένα από τα υλικά του δομικού συστήματος.



Προφίλ Εμπλεκόμενων Φορέων

Αποφασίζων είναι η Γενική Διεύθυνση Αρχαιοτήτων και Πολιτιστικής Κληρονομιάς (Υπουργείο Πολιτισμού, Παιδείας και Θρησκευμάτων).

Αναλυτής είναι το Εργαστήριο Υλικών (Σχολή Χημικών Μηχανικών) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο ανέλαβε τη σύνταξη (γνωμοδοτικής) μελέτης αποκατάστασης, αλλά και το συντονισμό των εργασιών (πιο σωστά αναλυτής είναι το προσωπικό του Εργαστηρίου).

Μεσολαβητής είναι η Διευθύντρια του Εργαστήριο Υλικών (Σχολή Χημικών Μηχανικών) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία έχει αναλάβει την επικοινωνία μεταξύ Υπουργείου και Εργαστηρίου (η ίδια δε θα εργαστεί περαιτέρω).

Ενδιαφερόμενος είναι ο Δήμος Αθηναίων, καθώς αποτελεί τον φορέα υλοποίησης των εργασιών (θα παρέχει τα συνεργεία εργασιών).

Γενικοί Στόχοι



- Συμβατότητα υλικών επέμβασης και αυθεντικών υλικών.
- Αντιστρεψιμότητα επέμβασης (στο μέτρο του δυνατού).
- Αισθητική: χρώμα, γυαλάδα του υλικού μετά τον καθαρισμό.
- Φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού μετά τον καθαρισμό.
- Καλός καθαρισμός της επιφάνειας.
- Καλή εργασιμότητα υλικών επέμβασης.
- Αντοχή επέμβασης στο χρόνο.
- Χαμηλό κόστος επέμβασης.



Κριτήρια Επιλογής

Οι μέθοδοι καθαρισμού ασκούν στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες φυσικές, χημικές και χρωματικές επιδράσεις. Έτσι, οι εναλλακτικές επιλογές δοκιμάστηκαν σε πιλοτικό επίπεδο πάνω στο μνημείο και εν συνεχεία μετρήθηκαν ορισμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, τα οποία αποτελούν τα κριτήρια επιλογής.

Ορισμένοι από τους γενικούς στόχους δεν αποτελούν βάση για τον καθορισμό των κριτηρίων επιλογής. Για παράδειγμα, το κόστος της επέμβασης δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς πρόκειται για επέμβαση σε ένα μνημείο (άλλωστε το κόστος των εξεταζόμενων επεμβάσεων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους). Αντίστοιχα, η εργασιμότητα των υλικών επέμβασης δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς τα συνεργεία που θα αναλάβουν το έργο έχουν χειριστεί ικανοποιητικά αντίστοιχα υλικά κατά το παρελθόν.



1^ο Κριτήριο Επιλογής: Πάχος γυψοποιημένης επιφάνειας (C_{r_1})

- Μονάδα μέτρησης: μm
- Προκύπτει από: μετρήσεις με Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με μικροανάλυση ακτινών Χ (SEM-EDX) EAM
- Στόχος: τιμές όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο του διαστήματος (2 – 30) μm^*

Σχόλιο: Για παράδειγμα, μια εναλλακτική με τιμή 50 υπερτερεί μιας άλλης με τιμή 52, μια εναλλακτική με τιμή 0 υπερτερεί μιας άλλης με τιμή 50, μια εναλλακτική με τιμή 10 υπερτερεί μιας άλλης με τιμή 0, μια εναλλακτική με τιμή 14 υπερτερεί μιας άλλης με τιμή 10 κ.ο.κ..

**Μικρότερες τιμές δηλώνουν απώλεια του προστατευτικού στρώματος γύψου, με συνέπεια την απώλεια αυθεντικού υλικού (ανεπιθύμητο) και μεγαλύτερες μη απομάκρυνση του γύψου (ανεπιθύμητο).*

2^ο Κριτήριο Επιλογής: Πυκνότητα ρηγματώσεων (C_{r_2})



- Μονάδα μέτρησης: %
- Προκύπτει από: ψηφιακή επεξεργασίας εικόνας, χρησιμοποιώντας εικόνες από SEM-EDX
- Στόχος: ελαχιστοποίηση

3^ο Κριτήριο Επιλογής: Λόγος πραγματικής / προβαλλόμενη επιφάνεια (C_{r_3})



- Μονάδα μέτρησης: mm^2
- Προκύπτει από: μετρήσεις με Laser Profilometer
- Στόχος: ελαχιστοποίηση



4^ο Κριτήριο Επιλογής: Τραχύτητα (C_r4)



- Μονάδα μέτρησης: mm
- Στόχος: ελαχιστοποίηση



5^ο Κριτήριο Επιλογής: Συνολική μεταβολή χρώματος, ΔΕ (C₅)



- Μονάδα μέτρησης: καθαρός αριθμός
- Προκύπτει από: μετρήσεις με Χρωματόμετρο
- Στόχος: τιμές όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο του διαστήματος (6 – 15)*

**Μικρότερες τιμές δηλώνουν μη καθαρισμό της επιφάνειάς (ανεπιθύμητο) και μεγαλύτερες απώλεια αυθεντικού υλικού (ανεπιθύμητο). Βλ. και Σχόλιο C₁.*



Βάρη

Τα βάρη επιλέγονται με βάση τις βιβλιογραφικές πηγές αναφορικά με τη σημαντικότητα κάθε κριτηρίου. Αναλυτικότερα, η μη απώλεια αυθεντικού υλικού (κριτήρια Cr_1 και Cr_5) κρίνεται εξαιρετικά σημαντική και προμοδοτείται με 3 (μεταξύ των κριτηρίων Cr_1 και Cr_5 δεν εκδηλώνεται κάποια προτίμηση). Ο χαμηλός λόγος πραγματικής / προβαλλόμενης επιφάνειας κρίνεται αμέσως λιγότερο σημαντικός και προμοδοτείται με 2. Τέλος, η πυκνότητα ρηγματώσεων και η τραχύτητα κρίνεται ότι (συγκριτικά) έχουν μικρότερη σημασία και συνεπώς λαμβάνουν ως βάρους 1.

| | Cr_1 | Cr_2 | Cr_3 | Cr_4 | Cr_5 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| w | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |



Εναλλακτικές

Πρόκειται για εμπορικά σκευάσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αντίστοιχες εφαρμογές:

- Πάστα MORA, 2h (P₁)
- Πάστα AB57, 2h (P₂)
- Πάστα NC, 2h (P₃)
- Πάστα Σηπιόλιθου, 3,5h (P₄)
- Πάστα AB57, 1h (P₅)
- Πάστα NC, 1h (P₆)
- Πάστα EDTA, 1h (P₇)

Σχόλιο: Ο χρόνος εφαρμογής μπορεί να αυξηθεί και να προκαλεί πιο έντονα αποτελέσματα. Συνεπώς ορισμένες πάστες δοκιμάζονται για διαφορετικούς χρόνους εφαρμογής, οπότε και προκύπτουν διαφορετικές εναλλακτικές.



Όρια κλάσεων

| Κλάση | 1 | 2 | 3 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| Cr_1 | (0 - 5] | (5 - 30] | (30 - 60] |
| Cr_2 | (0 - 10] | (10 - 25] | (25 - 60] |
| Cr_3 | (1 - 1,5] | (1,5 - 3] | (3 - 4] |
| Cr_4 | (0 - 10] | (10 - 20] | (20 - 50] |
| Cr_5 | (0 - 6] | (6 - 15] | (15 - 40] |

Σχόλιο: Τα όρια των κλάσεων για κάθε φυσικοχημικό κριτήριο έχουν προκύψει τόσο βιβλιογραφικά, όσο και από την εμπειρία σε ανάλογες εφαρμογές.

Πίνακας Κριτηρίων – Εναλλακτικών με Κλάσεις



| | Cr ₁ | Cr ₂ | Cr ₃ | Cr ₄ | Cr ₅ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| P ₁ | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| P ₂ | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| P ₃ | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| P ₄ | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| P ₅ | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| P ₆ | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| P ₇ | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 |

Σχόλιο: Ο συγκεκριμένος Πίνακας δε χρησιμοποιείται στη συνέχεια, καθώς καμία από τις εξεταζόμενες μεθόδους δεν απαιτεί κλάσεις. Παρατίθεται για λόγους πληρότητας της παρούσας μελέτης.

Εφαρμογή Μεθόδου ELECTRE I χωρίς veto

A

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.



Πίνακας Κριτηρίων – Εναλλακτικών

| | Cr_1 | Cr_2 | Cr_3 | Cr_4 | Cr_5 |
|--------|----------|--------|--------|--------|----------|
| Στόχος | (2 - 30) | min | min | min | (6 - 15) |
| w | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| P_1 | 0 | 11,4 | 1,385 | 7 | 31,44 |
| P_2 | 0 | 13,8 | 1,625 | 13 | 31,20 |
| P_3 | 0 | 16,3 | 1,427 | 7 | 38,40 |
| P_4 | 50 | 10,0 | 1,350 | 6 | 5,52 |
| P_5 | 12 | 10,4 | 1,428 | 7 | 14,70 |
| P_6 | 0 | 10,5 | 1,351 | 6 | 37,70 |
| P_7 | 55 | 12,1 | 1,324 | 5 | 7,38 |

Πίνακας Συμφωνίας



| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | P ₇ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| P ₁ | | 0,70 | 0,40 | 0,30 | 0,30 | 0,60 | 0,40 |
| P ₂ | 0,60 | | 0,70 | 0,30 | 0,00 | 0,60 | 0,30 |
| P ₃ | 0,40 | 0,50 | | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| P ₄ | 0,70 | 0,70 | 0,70 | | 0,40 | 0,70 | 0,40 |
| P ₅ | 0,80 | 1,00 | 0,80 | 0,60 | | 0,70 | 0,40 |
| P ₆ | 0,70 | 0,70 | 1,00 | 0,40 | 0,30 | | 0,40 |
| P ₇ | 0,60 | 0,70 | 0,70 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | |



Πίνακας Ασυμφωνίας

| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | P ₇ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| P ₁ | | 0,00 | 0,00 | 0,47 | 0,30 | 0,02 | 0,44 |
| P ₂ | 0,11 | | 0,11 | 0,47 | 0,30 | 0,13 | 0,43 |
| P ₃ | 0,09 | 0,13 | | 0,60 | 0,43 | 0,11 | 0,56 |
| P ₄ | 0,91 | 0,91 | 0,91 | | 0,69 | 0,91 | 0,03 |
| P ₅ | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,02 | | 0,22 | 0,13 |
| P ₆ | 0,11 | 0,12 | 0,00 | 0,59 | 0,42 | | 0,55 |
| P ₇ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,09 | 0,78 | 1,00 | |



Πυρήνας

$c=1,00$ και $d=0,00 \rightarrow P_6 \text{ S } P_3 \rightarrow \Pi = \{P_1, P_2, P_4, P_5, P_6, P_7\}$

$c=1,00$ και $d=0,22 \rightarrow P_5 \text{ S } P_2 \rightarrow \Pi = \{P_1, P_4, P_5, P_6, P_7\}$

$c=0,80$ και $d=0,22 \rightarrow P_5 \text{ S } P_1 \rightarrow \Pi = \{P_4, P_5, P_6, P_7\}$

$c=0,70$ και $d=0,22 \rightarrow P_5 \text{ S } P_6 \rightarrow \Pi = \{P_4, P_5, P_7\}$

$c=0,60$ και $d=0,09 \rightarrow P_7 \text{ S } P_4 \rightarrow \Pi = \{P_5, P_7\}$

Σχόλιο: Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία της ELECTRE I, δεν ενδείκνυται η εξέταση για τιμές μικρότερες από $c=0,7$ (και μεγαλύτερες από $d=0,3$). Παρόλα αυτά, έγινε μια προσπάθεια «χαλάρωσης» σε $c=0,6$ ώστε να εξεταστεί αν μπορεί να απορριφθεί κάποια επιπλέον εναλλακτική (P_4).

Συμπεράσματα



- Η εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE I χωρίς veto έδειξε ότι ενδείκνυται η χρησιμοποίηση ενός εκ των εξής δύο υλικών καθαρισμού των μαρμάρων της Εθνικής Βιβλιοθήκης:
 - Πάστα AB57, 1h
 - Πάστα EDTA, 1h
- Οι δύο παραπάνω εναλλακτικές κρίνονται ισοδύναμες, με βάση τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο και τα κριτήρια που ελήφθησαν υπόψη.
- Σχεδόν ισοδύναμο με τις παραπάνω δύο εναλλακτικές (οπότε και επίσης ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί) είναι το υλικό:
 - Πάστα Σηπιόλιθου, 3,5h

Εφαρμογή Μεθόδου
ELECTRE I με veto

B

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.



Κατώφλια veto

Τα veto επιλέγονται με βάση τις ιδιότητες των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών – κριτηρίων που εξετάζονται. Ειδικότητα, πυκνότητα ρηγματώσεων (Cr_2) κάτω από 1,2% θεωρείται αμελητέα. Αντίστοιχα, διαφορά χρώματος (Cr_5) μικρότερη από 5 έχει αποδειχτεί ότι δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Για τα υπόλοιπα κριτήρια επιλέγεται η μη χρησιμοποίηση veto, καθώς ακόμα και μικρές διαφορές (της τάξεως μεγέθους που μπορεί να μετρηθεί) στις τιμές των εν λόγω φυσικοχημικών χαρακτηριστικών έχουν σημαντική επίπτωση στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του μαρμάρου.

| | Cr_1 | Cr_2 | Cr_3 | Cr_4 | Cr_5 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| veto | - | 1,2 | - | - | 5 |



Πίνακας Κριτηρίων – Εναλλακτικών με veto

| | Cr ₁ | Cr ₂ | Cr ₃ | Cr ₄ | Cr ₅ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Στόχος | (2 - 30) | min | min | min | (6 - 15) |
| veto | - | 1,2 | - | - | 5 |
| w | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| P ₁ | 0 | 11,4 | 1,385 | 7 | 31,44 |
| P ₂ | 0 | 13,8 | 1,625 | 13 | 31,20 |
| P ₃ | 0 | 16,3 | 1,427 | 7 | 38,40 |
| P ₄ | 50 | 10,0 | 1,350 | 6 | 5,52 |
| P ₅ | 12 | 10,4 | 1,428 | 7 | 14,70 |
| P ₆ | 0 | 10,5 | 1,351 | 6 | 37,70 |
| P ₇ | 55 | 12,1 | 1,324 | 5 | 7,38 |

Πίνακας Συμφωνίας



| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | P ₇ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| P ₁ | | 0,70 | 0,40 | 0,30 | 0,30 | 0,60 | 0,40 |
| P ₂ | 0,60 | | 0,70 | 0,30 | 0,00 | 0,60 | 0,30 |
| P ₃ | 0,40 | 0,50 | | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| P ₄ | 0,70 | 0,70 | 0,70 | | 0,40 | 0,70 | 0,40 |
| P ₅ | 0,80 | 1,00 | 0,80 | 0,60 | | 0,70 | 0,40 |
| P ₆ | 0,70 | 0,70 | 1,00 | 0,40 | 0,30 | | 0,40 |
| P ₇ | 0,60 | 0,70 | 0,70 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | |



Πίνακας Ασυμφωνίας

| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | P ₇ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| P ₁ | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| P ₂ | 1 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| P ₃ | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| P ₄ | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 0 |
| P ₅ | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 |
| P ₆ | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 1 |
| P ₇ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |



Πυρήνας

$$s=1,00 \rightarrow P_6 \text{ S } P_3$$

$$s=1,00 \rightarrow P_5 \text{ S } P_2$$

$$s=0,80 \rightarrow P_5 \text{ S } P_1$$

$$s=0,80 \rightarrow P_5 \text{ S } P_3$$

$$s=0,70 \rightarrow P_4 \text{ S } P_6$$

$$s=0,70 \rightarrow P_5 \text{ S } P_6$$

$$s=0,70 \rightarrow P_4 \text{ S } P_1$$

$$s=0,70 \rightarrow P_4 \text{ S } P_3$$

$$s=0,70 \rightarrow P_7 \text{ S } P_3$$

$$s=0,70 \rightarrow P_7 \text{ S } P_2$$

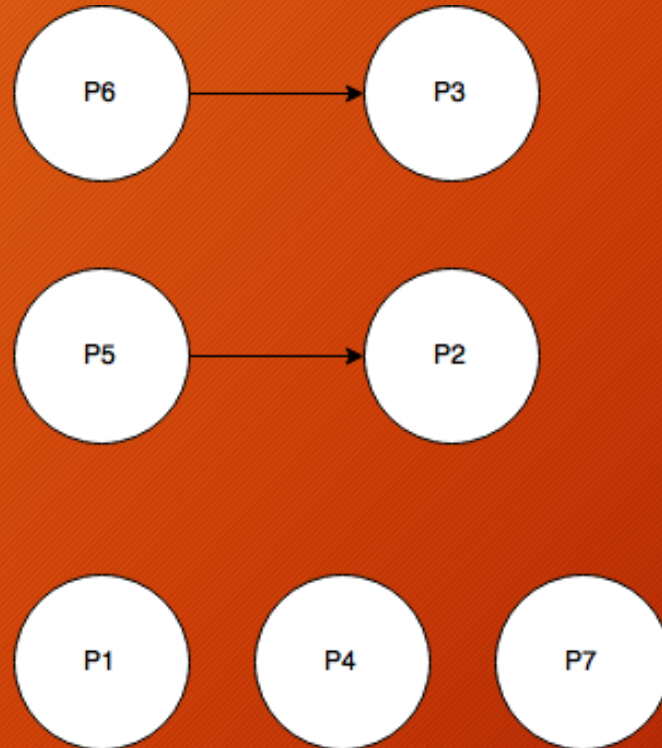
$$s=0,60 \rightarrow P_5 \text{ S } P_4$$

$$s=0,60 \rightarrow P_7 \text{ S } P_1$$

$$s=0,60 \rightarrow P_1 \text{ S } P_6$$

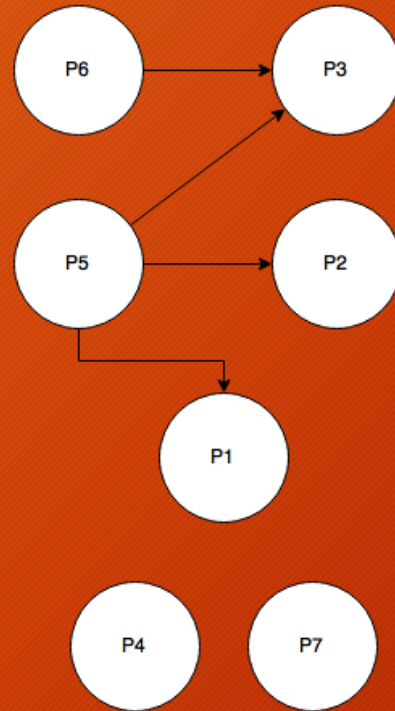
Σχόλιο: Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία της ELECTRE I, δεν ενδείκνυται η εξέταση για τιμές μικρότερες από $s=0,7$. Παρόλα αυτά, έγινε μια προσπάθεια «χαλάρωσης» σε $s=0,6$ ώστε να εξεταστεί αν μπορεί να απορριφθεί κάποια επιπλέον εναλλακτική (P_4). Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο είναι το s , τόσο πιο ισχυρή είναι η υπεροχή.

Διάγραμμα Υπεροχής $s=1,00$ (εξαιρετικά επιεικές)



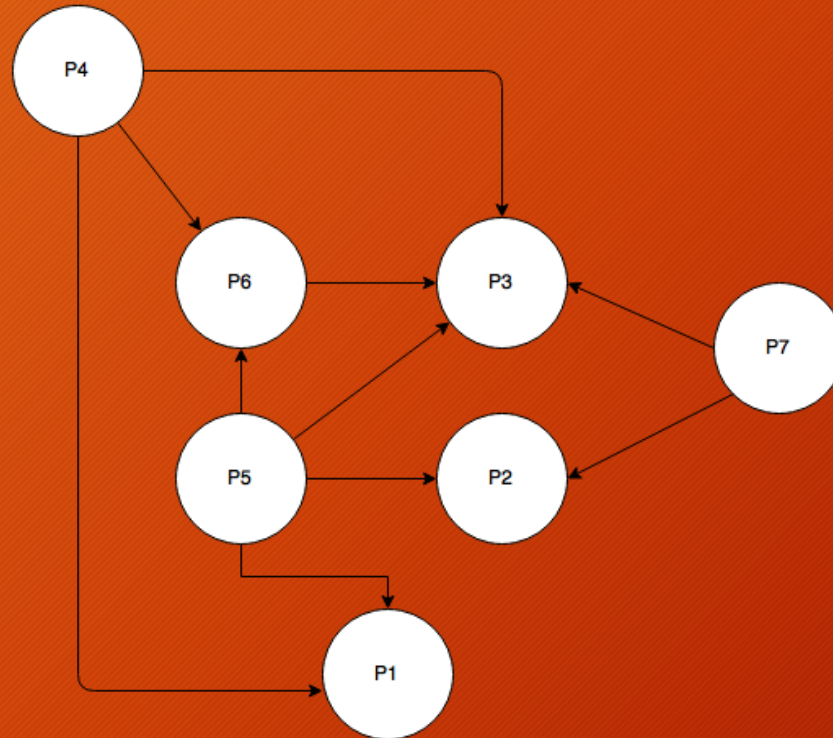
$$\Pi = \{P_1, P_4, P_5, P_6, P_7\}$$

Διάγραμμα Υπεροχής $s=0,80$ (επιεικές)



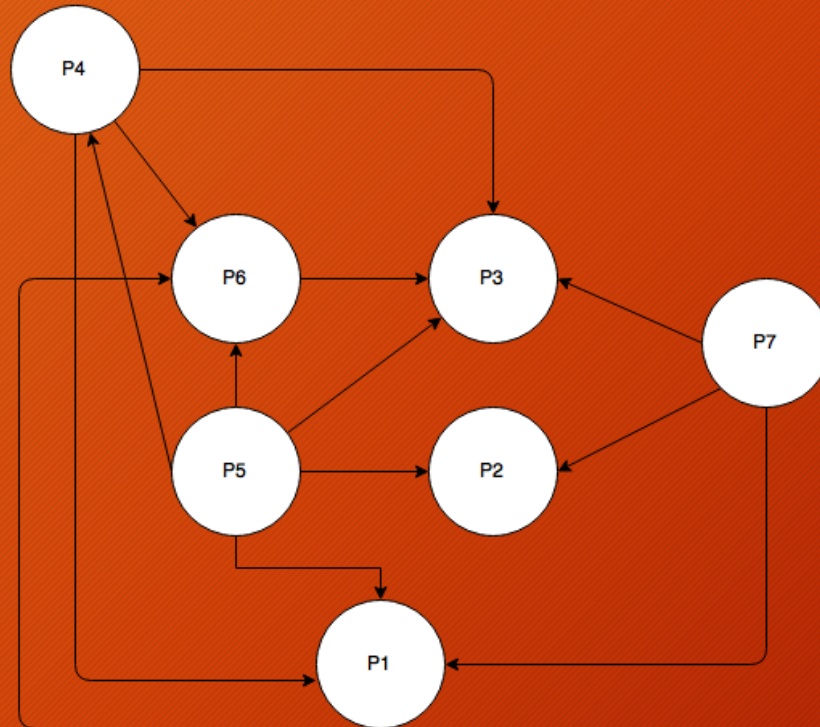
$$\Pi = \{P_4, P_5, P_6, P_7\}$$

Διάγραμμα Υπεροχής $s=0,70$ (σχετικά αυστηρό)



$$\Pi = \{P_4, P_5, P_7\}$$

Διάγραμμα Υπεροχής $s=0,60$ (εξαιρετικά αυστηρό)



$$\Pi = \{P_5, P_7\}$$



Συμπεράσματα ELECTRE I

- Η εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE I με veto έδωσε τα ίδια αποτελέσματα με την εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE I χωρίς veto. Ειδικότερα, έδειξε ότι ενδείκνυται η χρησιμοποίηση ενός εκ των εξής δύο υλικών καθαρισμού των μαρμάρων της Εθνικής Βιβλιοθήκης (ισοδύναμες εναλλακτικές):
 - Πάστα AB57, 1h
 - Πάστα EDTA, 1h
- Σχεδόν ισοδύναμο (χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλές τιμές $c=0,6$ και $s=0,6$ για να απορριφθεί) με τις παραπάνω δύο εναλλακτικές (οπότε και επίσης ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί) είναι το υλικό:
 - Πάστα Σηπιόλιθου, 3,5h

Εφαρμογή Μεθόδου PROMETHEE



ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.



Κριτήρια – Βάρη – Κατώφλια

Για τα C_{r_1} , C_{r_3} και C_{r_4} δεν είναι δυνατόν να επιλέγει κατώφλι veto, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, ακόμα και μικρές διαφορές (της τάξεως μεγέθους που μπορεί να μετρηθεί) στις τιμές των εν λόγω φυσικοχημικών χαρακτηριστικών έχουν σημαντική επίπτωση στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του μαρμάρου. Για το C_{r_2} επιλέγεται το κριτήριο 3 (Κριτήριο Γραμμικής Προτίμησης), με κατώφλι veto ίδιο με προηγούμενως. Για το C_{r_5} επιλέγεται το κριτήριο 5 (Κριτήριο Γραμμικής Προτίμησης και Περιοχής Αδιαφορίας), καθώς είναι πιο ακριβές από το 3, γεγονός χρήσιμο, καθώς το C_{r_5} έχει υψηλότερο βάρος από το C_{r_3} . Τα p και q έχουν τιμές κοντά στο κατώφλι veto (5) που χρησιμοποιήθηκε προηγούμενως. Τέλος, όλα τα βάρη είναι ίδια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν προηγούμενως.



Πίνακας Κριτηρίων – Εναλλακτικών

| | Cr ₁ | Cr ₂ | Cr ₃ | Cr ₄ | Cr ₅ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Στόχος | (2 - 30) | min | min | min | (6 - 15) |
| P ₁ | 0 | 11,4 | 1,385 | 7 | 31,44 |
| P ₂ | 0 | 13,8 | 1,625 | 13 | 31,2 |
| P ₃ | 0 | 16,3 | 1,427 | 7 | 38,4 |
| P ₄ | 50 | 10 | 1,35 | 6 | 5,52 |
| P ₅ | 12 | 10,4 | 1,428 | 7 | 14,7 |
| P ₆ | 0 | 10,5 | 1,351 | 6 | 37,7 |
| P ₇ | 55 | 12,1 | 1,324 | 5 | 7,38 |
| w | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| ΚΡΙΤΗΡΙΟ | 1 | 3 | 1 | 1 | 5 |
| q | - | - | - | - | 4 |
| p | - | 1,2 | - | - | 7 |

Cr_2



| Cr_2 | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 | P_6 | P_7 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P_1 | | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,58 |
| P_2 | 0,00 | | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| P_3 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| P_4 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | 0,33 | 0,42 | 1,00 |
| P_5 | 0,83 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | | 0,08 | 1,00 |
| P_6 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | | 1,00 |
| P_7 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |

Cr_5



| Cr_5 | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 | P_6 | P_7 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P_1 | | 0,00 | 0,99 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| P_2 | 0,00 | | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,83 | 0,00 |
| P_3 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| P_4 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| P_5 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,07 | | 1,00 | 0,00 |
| P_6 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 |
| P_7 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | | 1,00 | |

Τελική Κατάταξη



| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | P ₇ | ΣΥΝΟΛΟ | φ+ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|-------|
| P ₁ | 0,00 | 0,40 | 0,60 | 0,30 | 0,20 | 0,00 | 0,36 | 1,85 | 0,309 |
| P ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,40 | 0,30 | 0,00 | 0,25 | 0,30 | 1,25 | 0,208 |
| P ₃ | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,30 | 0,20 | 0,00 | 0,30 | 1,10 | 0,183 |
| P ₄ | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,00 | 0,43 | 0,64 | 0,40 | 3,58 | 0,596 |
| P ₅ | 0,68 | 1,00 | 0,70 | 0,32 | 0,00 | 0,61 | 0,40 | 3,71 | 0,619 |
| P ₆ | 0,38 | 0,30 | 0,40 | 0,30 | 0,30 | 0,00 | 0,40 | 2,08 | 0,346 |
| P ₇ | 0,60 | 0,70 | 0,70 | 0,30 | 0,30 | 0,60 | 0,00 | 3,20 | 0,533 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 2,36 | 3,40 | 3,50 | 1,82 | 1,43 | 2,10 | 2,16 | | |
| φ- | 0,393 | 0,567 | 0,583 | 0,303 | 0,239 | 0,350 | 0,360 | | |
| φ | -0,084 | -0,358 | -0,399 | 0,293 | 0,380 | -0,004 | 0,174 | | |

$P_5 \rightarrow P_4 \rightarrow P_7 \rightarrow P_6 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$

Συμπεράσματα PROMETHEE



- Η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE κατέταξε τα υλικά καθαρισμού των μαρμάρων της Εθνικής Βιβλιοθήκης, με την εξής σειρά (από το πιο προτιμητέο προς το λιγότερο):
 - Πάστα AB57, 1h
 - Πάστα Σηπιόλιθου, 3,5h
 - Πάστα EDTA, 1h
 - Πάστα NC, 1h
 - Πάστα MORA, 2h
 - Πάστα AB57, 2h
 - Πάστα NC, 2h



Γενικά Συμπεράσματα (1/2)

- Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των 3 μεθόδων συγκλίνουν στο γεγονός ότι καταλληλότερο υλικό καθαρισμού των μαρμάρων της Εθνικής Βιβλιοθήκης είναι το:
 - Πάστα AB57, 1h
- Οι μέθοδοι ELECTRE I με και χωρίς veto συμφωνούν ότι ισοδύναμη της παραπάνω εναλλακτικής είναι η εναλλακτική:
 - Πάστα EDTA, 1hενώ σχεδόν ισοδύναμη είναι η εναλλακτική:
 - Πάστα Σηπιόλιθου, 3,5h
- Η μέθοδος PROMETHEE καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι παραπάνω 2 εναλλακτικές είναι οι αμέσως καταλληλότερες, αλλά τις κατατάσσει με την αντίθετη σειρά.



Γενικά Συμπεράσματα (2/2)

- Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι το χαλάρωμα σε $c=0,6$ κατά την εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE I ($s=0,6$ στην περίπτωση της ELECTRE I με veto) απέκλεισε μία εναλλακτική, η οποία κρίνεται εξαιρετικά προτιμητέα, με βάση τη μέθοδο PROMETHEE.
- Εφόσον το ζητούμενο είναι η επιλογή μίας και μόνο εναλλακτικής, αυτή θα είναι η τομή των συνόλων των αποτελεσμάτων των 3 μεθόδων, δηλαδή η εναλλακτική:
 - Πάστα AB57, 1h



Προοπτικές

Προκειμένου να επιβεβαιωθούν να συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, προτείνετε η διεξαγωγή ορισμένων επιπρόσθετων ενεργειών:

- Δοκιμή εφαρμογής επιπλέον μεθόδων.
- Δοκιμή τροποποίησης των βαρών ή/και των veto και έλεγχος ευαισθησίας.
- Εξέταση περισσότερων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών ή λοιπών κριτηρίων, κυρίως για την αποσαφήνιση της θέσης των εναλλακτικών Πάστα Σηπιόλιθου, 3,5h και Πάστα EDTA, 1h.
- Επανάληψη των μετρήσεων των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί.
- Χρησιμοποίηση οργάνων μέτρησης μεγαλύτερης ακρίβειας.
- Δοκιμή περισσότερων υλικών – εναλλακτικών.

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΧΗΜΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

Επιλογή κατάλληλου υλικού καθαρισμού των μαρμάρων της Εθνικής Βιβλιοθήκης, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους ELECTRE I με και χωρίς veto και PROMETHEE.

Πολυκριτηριακά
Συστήματα
Υποστήριξης
Αποφάσεων

ευχαριστώ θερμά
για την προσοχή σας!

Υπεύθυνοι Καθηγητές:

Δούκας, Χ.
Ξυδώνας, Π.
Ψαρράς, Γ.