

Αναβίωση της Αρχαίας Τεχνογνωσίας του Αιγυπτιακού Μπλε (CaCuSi₄O₁₀) με την μέθοδο SCS, Σύνθεση Καύσης Στερεών

Αδαμαντία Π. Παναγοπούλου^{1,2}, Γκαλίνα Ξανθοπούλου², Κωνσταντίνος Καρανάσιος²

¹Συντήρηση Πολιτισμικής Κληρονομιάς, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ιονίων Νήσων, Τμήμα Τεχνολόγων Περιβάλλοντος, Ζάκυνθος, 29100.

mpanagopoulou@ims.demokritos.gr

²Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Αγία Παρασκευή Αττικής, 15310. gxantho@ims.demokritos.gr, konkaranasios@yahoo.gr, gvekinis@ims.demokritos.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Αιγυπτιακό μπλε, CaCuSi₄O₁₀, είναι μια χρωστική ουσία που χρησιμοποιούνταν στην αρχαία Αίγυπτο από το 3.000 π.Χ. Είναι η πρώτη συνθετική χρωστική ουσία που κατασκευάστηκε υποδεικνύοντας μια σπουδαία τεχνολογική καινοτομία. Η χρωστική αυτή ουσία αποτελείται από CaCuSi₄O₁₀ με μεταβλητές ποσότητες βολαστονίτη (CaSiO₃), υψηλή ποσότητα Cu, κυπρίτη (Cu₂O) ή τενορίτη (CuO). Παρασκευαζόταν με τήξη του υψηλού ποσοστού χαλκού σε ένωση με ασβέστη και άμμο ερήμου.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται η προσπάθεια σύνθεσης του Αιγυπτιακού μπλε μέσω της μεθόδου SCS, αυτοπροωθούμενη σύνθεση υψηλής θερμοκρασίας (self-propagating high temperature synthesis, SCS). Η αυτοσυντηρούμενη αντίδραση πραγματοποιήθηκε σε ομογενές υδατικό διάλυμα αποτελούμενο από 25% Cu(NO₃)₂ +24,6% Ca(NO₃)₂ +50,4% Na₂SiO₃ +40% Urea+3.6% H₂O. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαδοχικά οι 700 °C, 750 °C, 800 °C και 850 °C για 2 ώρες. Με την μέθοδο αυτή επιτεύχθηκε η γρήγορη, οικονομική και χημικά σταθερή σύνθεση μιας ποικιλίας αποχρώσεων νανοδομημένων χρωστικών του Αιγυπτιακού μπλε.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αιγυπτιακό μπλε, χρωστική, SCS, SEM, XRD.

Εισαγωγή

Η ζωγραφική εμφανίζεται σε όλους τους πολιτισμούς στην ιστορία του ανθρώπινου και αποτελεί σημαντικό εργαλείο των θρησκευτικών, λατρευτικών και των αισθητικών αντιλήψεων. Από τις προϊστορικές βραχογραφίες των αρχαίων πολιτισμών έως τις σύγχρονες τέχνες, αντικατόπτριζε πάντα την βαθιά επιθυμία της καλλιτεχνικής έκφρασης. Συμβολική φαντασία των θεοτήτων και μαγικές δυνάμεις ήταν ένας παράγοντας ελέγχου στην επιλογή των χρωμάτων κατά την αρχαιότητα.

Μια από τα παλαιότερες συνθετικές χρωστικές στην αρχαία αιγυπτιακή ιστορία είναι Αιγυπτιακό μπλε, CaCuSi₄O₁₀. Το Αιγυπτιακό μπλε έχει καταγραφεί ως μια μπλε χρωστική ουσία σε τοιχογραφίες τάφων και ναούς της αρχαίας Αιγύπτου μετά την τέταρτη Δυναστεία του Παλαιού Βασιλείου (2600-2480 π.Χ.). Αυτή η χρωστική ουσία τύχει ευρείας εφαρμογής σε αρχαία αιγυπτιακά έργα ζωγραφικής στην Παλαιά, Μέση και Νέα βασιλεία, των Πτολεμαίων και στους Ρωμαϊκούς χρόνους. Στην αυγή του Νέου Βασιλείου, κατά την έναρξη της 18ης Δυναστείας (1552-1306 π.Χ.), Αιγυπτιακά μνημεία μαρτυρούν μια έκρηξη στη χρήση αυτής της χρωστικής ουσίας σε τάφους και ναούς [1,2]. Ο όρος για αυτό στην αιγυπτιακή γλώσσα σημαίνει τεχνητή λάπις λάζουλι.

Η συνταγή παρασκευής του έμεινε για πολλούς αιώνες μυστική. Ήταν μια πολύ ακριβή χρωστική και χρησιμοποιούνταν με φειδώ [3]. Σήμερα έχει εντοπιστεί πάνω σε αττικές ληκύθους κλασικών χρόνων, σε τοιχογραφίες μακεδονικών τάφων όπως στη Βεργίνα αλλά και σε αγάλματα στην ακρόπολη.

Την σύνθεση αυτής της χρωστικής ουσίας που όπως αλλιώς ονομαζόταν «caeruleum», περιγράφει ο Βιτρούβιος στο Περί Αρχιτεκτονικής κατά το 1ο αι. π.Χ., γινόταν με θέρμανση ενός μείγματος που αποτελείται από πυριτική άμμο, ασβέστη (ή ασβεστούχα άμμο), ενώσεις του χαλκού (ορυκτά ή χάλκινα θραύσματα) και κάποιο ευτηκτικό (σόδα, ή τα φυτική τέφρα) [4]. Ο Βιτρούβιος δεν ανέφερε ρητώς το ανθρακικό ασβέστιο μεταξύ των συστατικών του Αιγυπτιακού μπλε, ίσως γιατί η άμμος που χρησιμοποιείται στο Pozzuoli, είχε τη σωστή αναλογία ασβεστίου στην σύστασή της. Λόγω όμως της πολύ μεγάλης ποσότητας CaO που απαιτείται θεωρείται περισσότερο πιθανή η χρήση χαλαζιακής άμμου, δεδομένου ότι το εμφανιζόμενο ποσοστό του οξειδίου του ασβεστίου δεν μπορεί εξολοκλήρου να προέρχεται από τις στάχτες φυτών [5]. Οι μεσαιωνικοί αντιγραφείς δεν το ανέφεραν, μεταξύ των απαραίτητων ενώσεων και ως εκ τούτου, η σύνθεση του Αιγυπτιακού μπλε δεν ήταν πλέον εφικτή. Αυτό είναι πιθανό να είναι μια από τις αιτίες της γρήγορης μείωσης της χρήσης του Αιγυπτιακού μπλε στη μεσαιωνική και αναγεννησιακή ζωγραφική, αλλά η κύρια αιτία ήταν η πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας με την επακόλουθη απώλεια της γνώσης και της τεχνολογίας [6, 7].

Υπάρχει μια γενική συμφωνία όσον αφορά τη θερμοκρασία τήξης, η οποία πρέπει να διατηρείται μεταξύ 850 και 950 ° C. Άνω των 1100 ° C, στην πραγματικότητα το Αιγυπτιακού μπλε αποσυντίθεται [8,9].

Στην παρούσα μελέτη γίνεται η προσπάθεια σύνθεσης του Αιγυπτιακού μπλε μέσω της μεθόδου CS ή η SHS. Η CS ή η SHS είναι μία αποτελεσματική, χαμηλού κόστους μέθοδος για την παραγωγή μιας πληθώρας βιομηχανικά χρήσιμων υλικών. Σήμερα η CS έχει γίνει μία πολύ δημοφιλής προσέγγιση για την προετοιμασία των νανοϋλικών και εφαρμόζεται σε πολλές χώρες. Η διαδικασία αυτή, ευρέως γνωστή ως αυτοπροωθούμενη σύνθεση υψηλής θερμοκρασίας (self-propagating high temperature synthesis, SHS), καλείται ακόμη «σύνθεση με φωτιά» [10].

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι τεχνικές βασισμένες σε καύση, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως CS ή SHS, αποτελούν μία αποτελεσματική ενεργειακά εξοικονομούμενη μέθοδο για τη σύνθεση μιας ποικιλίας προηγμένων υλικών.

Μέθοδος και υλικά

Η Μέθοδος σύνθεσης υγρής καύσης (SCS) είναι μια ευέλικτη, απλή και γρήγορη διαδικασία, η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική σύνθεση μιας ποικιλίας νανοδομημένων υλικών. Η τεχνική (SCS) χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι μόλις η αρχική εξώθερμη αντίδραση μίγματος αναφλεγεί με τη βοήθεια μιας εξωτερικής πηγής θέρμανσης, ένα γρήγορο (τυπικά από 0,1 ως 10 cm/s), υψηλής θερμοκρασίας (1000-1500C) κύμα αντίδρασης προωθείται μέσα από το ετερογενές μίγμα με έναν αυτοσυντηρούμενο τρόπο οδηγώντας στο σχηματισμό του στερεού υλικού χωρίς επιπλέον προσφορά ενέργειας.

Ωστόσο, στη συμβατική CS διαδικασία, το αρχικό μέσο αντίδρασης είναι ένα μίγμα σκόνης με χαρακτηριστική κλίμακα ετερογένειας με εύρος από 1 νανόμετρο έως και

μερικά μικρά. Το χαρακτηριστικό αυτό σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες αντίδρασης των 1500 οC καθιστούν δύσκολη τη σύνθεση υλικών νανο-μεγέθους με ειδική επιφάνεια μεγαλύτερη των 500m²/g, αλλά προσφέρει ένα γρήγορο τρόπο για το σχηματισμό προϊόντος με την δημιουργία χαρακτηριστικής κρυσταλλικής δομής. Είναι μια γρήγορη, οικονομική μέθοδο παραγωγής νανοϋλικών σε ένα στάδιο.



Εικ.1 . SCS της χρωστικής του Αιγυπτιακού μπλε.

Ένας συνδυασμός της CS και της προσέγγισης αντιδρώντος διαλύματος οδηγεί στις μεθόδους SCS. Τυπικά, η SC περιλαμβάνει μία αυτοσυντηρούμενη αντίδραση σε διαλύματα με νιτρικά μέταλλα και διαφορετικές καύσιμες ύλες, που μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη χημική τους δομή. Η αντίδραση ανάμεσα σε καύσιμη ύλη και οξυγόνο που περιέχει είδη τα οποία σχηματίζονται κατά την αποσύνθεση των νιτρικών ειδών παρέχει τη γρήγορη, θερμοκρασιακά υψηλή αλληλεπίδραση. Σε μία τυπική διαδικασία, ένα αρχικό διάλυμα με τα επιθυμητά αντιδραστήρια, αφού προθερμανθεί σε θερμοκρασία (150 οC) αυτό-αναφλέγεται κατά μήκος όλου του όγκου (VCS) οδηγώντας στο σχηματισμό λεπτών στερεών προϊόντων με προσαρμοσμένη σύνθεση [11].

Στην παρούσα μελέτη η αυτοσυντηρούμενη αντίδραση πραγματοποιήθηκε σε ένα ομογενές υδατικό διάλυμα με 25% Cu(NO₃)₂ +24,6% Ca(NO₃)₂ +50,4% Na₂SiO₃ +40% Urea+3.6% H₂O. Αυτή η σύνθεση διαρκεί μερικά λεπτά, αλλά χρησιμοποιείται πρόσθετη θερμική επεξεργασία καθώς οι συνθήκες αυτές είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση των αντιδράσεων και τον πλήρη σχηματισμό της δομής του κρυσταλλικού πλέγματος. Διαδοχικά χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοκρασίες 700 °C, 750 °C, 800 °C και 850 °C για 2 ώρες. Οι χρωστικές χαλκού είναι σημαντικής σημασίας για την κεραμική βιομηχανία λόγω της μεγάλης ποικιλίας των χρωμάτων τους, τις μοναδικές ιδιότητές τους και τη σταθερότητά τους κάτω από χημικές, θερμικές και αναγωγικές συνθήκες. Οι χρωστικές που παρασκευάστηκαν μελετήθηκαν με περίθλαση ακτίνων X (XRD) και με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM). Βάση της δομής των υλικών μελετήσαμε τα κρυσταλλικά επίπεδα με τον τύπο Bragg $d=(n\lambda)/(2\sin\theta)$ [13] και το μέσω μέγεθος σωματιδίων $D=(0.89\lambda)/(\beta\cos\theta)$ [12].

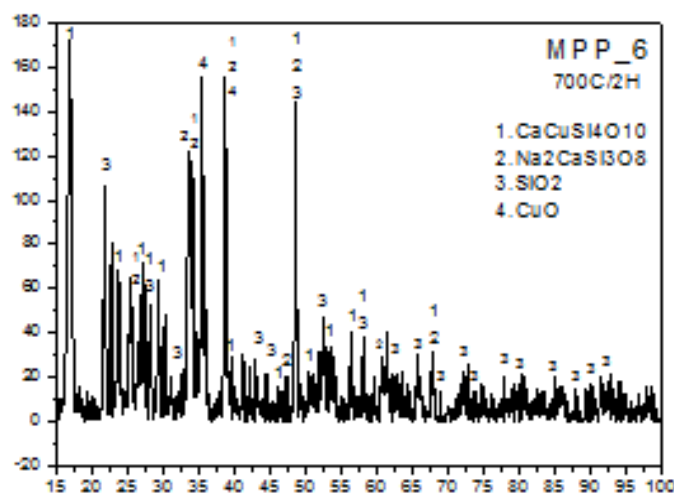
Αποτελέσματα και συζήτηση

Κατά την πρώτη σύνθεση αναμείχθηκαν 2,5 % Cu(NO₃)₂ με 2,46 % Ca (NO₃)₂ και 5,04 % Na₂SiO₃ σε ένα κεραμικό σκεύος. Έπειτα προστέθηκε 5 ml H₂O και 4 gr Urea. Το μείγμα αυτό τοποθετήθηκε σε κλίβανο στους 700 °C για 2 ώρες. Μετά το πέρας των δύο ωρών αφέθηκε στον κλίβανο μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου.

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε ακλουθώντας την ίδια ακρίβεια των ποσοτήτων των χημικών αντιδρώντων αλλά σε διαφορετικές θερμοκρασίες αυτοπροωθούμενης

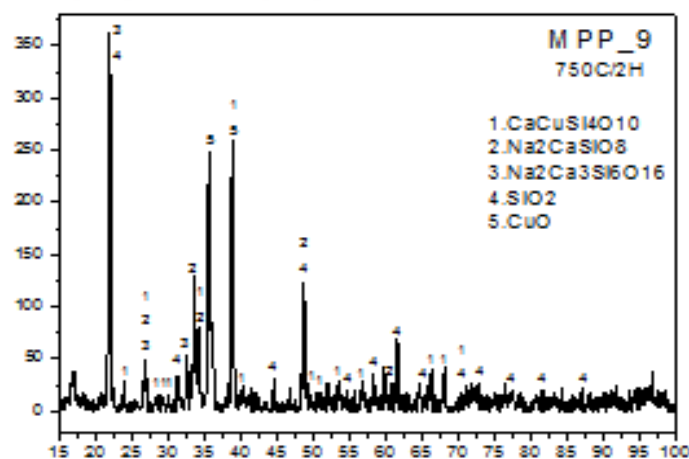
σύνθεσης. Οι θερμοκρασίες που ακολούθως υλοποιήθηκε η διαδικασία είναι οι 750 °C, 800 °C και 850 °C.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις με την Φασματοσκοπία Περίθλασης Ακτίνων-X (XRD) παρατηρήθηκε πως και στις τέσσερις παραγόμενες χρωστικές ουσίες ανιχνεύτηκε η σύνθεση του Αιγυπτιακού Μπλε στην δομή τους γεγονός το οποίο ταυτοποιείται και παρακάτω από τις αναλύσεις EDX.



Εικ. 3 XRD ανάλυση του δείγματος 25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ + 24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 50,4% Na_2SiO_3 + 40% Urea + 3.6% H_2O . Έψηση για 2 ώρες στους 700 °C

Στην Εικ.3 όπου η καύση της συνθέσεως πραγματοποιήθηκε στους 700 °C παρατηρείται η δημιουργία Αιγυπτιακού Μπλε, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, καθώς επίσης και βολαστονίτη, $\text{Na}_2\text{CaSi}_3\text{O}_8$. Ένα μεγάλο ποσοστό των αντιδρώντων δεν έχει συνενωθεί παράγοντας προϊόντα με αποτέλεσμα να παρατηρείται σε μεγάλη έκταση η ύπαρξη SiO_2 και CuO .

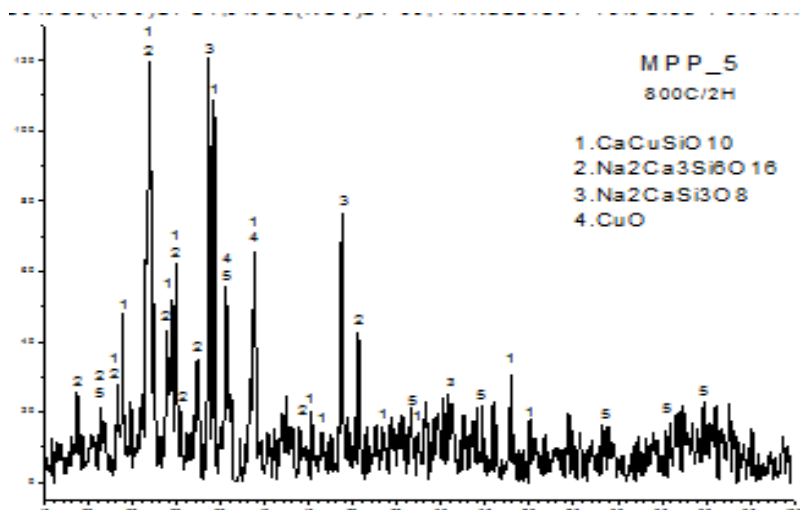


Εικ.4. XRD ανάλυση του δείγματος 25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ + 24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 50,4% Na_2SiO_3 + 40% Urea + 3.6% H_2O . Έψηση για 2 ώρες στους 750 °C.

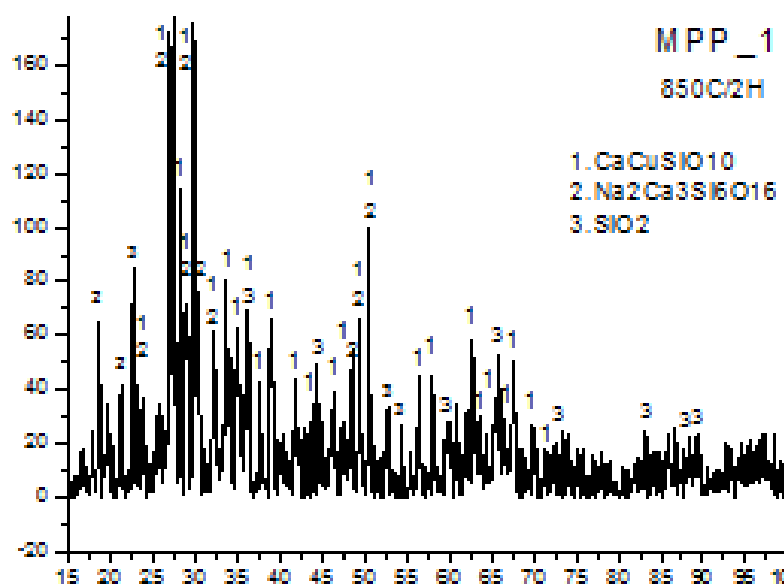
Στην Εικ.4 όπου η καύση της συνθέσεως πραγματοποιήθηκε στους 750 °C παρατηρείται η δημιουργία Αιγυπτιακού Μπλε, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, καθώς επίσης και δύο χημικών τύπων βολαστονίτη, $\text{Na}_2\text{CaSi}_3\text{O}_8$ και $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$. Σε αυτό το δείγμα παρατηρείται επίσης

η ύπαρξη χημικά μη αντιδρώντων SiO_2 και CuO . Η ύπαρξη Αιγυπτιακού μπλε είναι υψηλότερη στους 750°C από ότι στους 700°C .

Στην Εικ.5 όπου η καύση της συνθέσεως πραγματοποιήθηκε στους 800°C παρατηρείτε η δημιουργία αυξημένης ποσότητας Αιγυπτιακού Μπλε, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, καθώς επίσης η ύπαρξη των δύο χημικών τύπων βολαστονίτη, $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$ και $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$. Σε αυτό το δείγμα παρατηρείται επίσης η ύπαρξη CuO σε πολύ μικρή ποσότητα



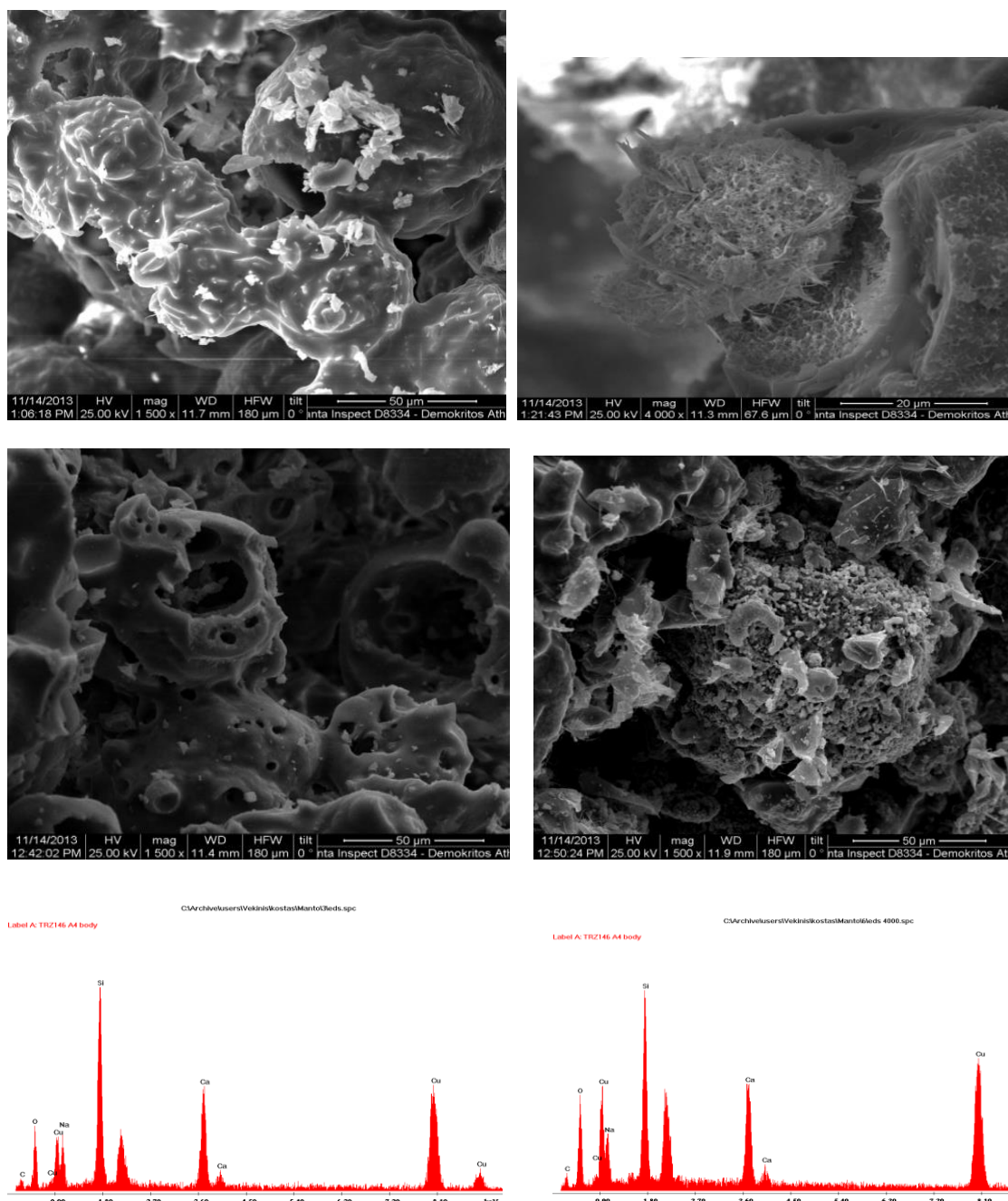
Εικ. 5 XRD ανάλυση του δείγματος $25\% \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + 24,6\% \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 50,4\% \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 40\% \text{Urea} + 3,6\% \text{H}_2\text{O}$. Έψηση για 2 ώρες στους 800°C .



Εικ. 6. XRD ανάλυση του δείγματος $25\% \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + 24,6\% \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 50,4\% \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 40\% \text{Urea} + 3,6\% \text{H}_2\text{O}$. Έψηση για 2 ώρες στους 850°C .

Στην Εικ.6 όπου η καύση της συνθέσεως πραγματοποιήθηκε στους 850°C παρατηρείτε η υψηλή ποσότητα ύπαρξης Αιγυπτιακού Μπλε, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, καθώς επίσης η ύπαρξη

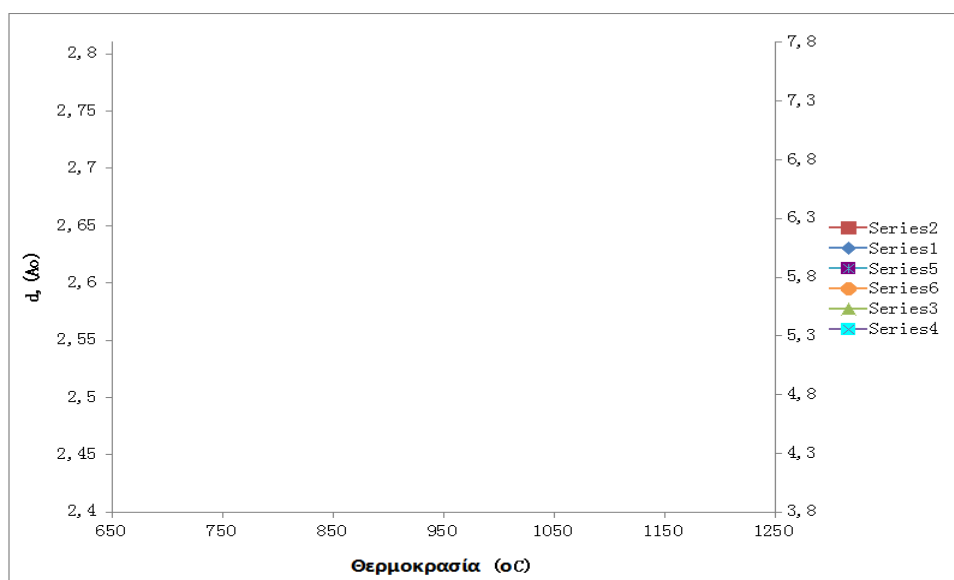
βολαστονίτη, $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$. Σε αυτό το δείγμα παρατηρείται επίσης η ύπαρξη μικρής ποσότητας SiO_2 . Το μεγαλύτερο ποσοστό των αντιδρώντων μετετράπη με επιτυχία σε Αιγυπτιακό μπλε και βολαστονίτη.



Εικ.7. SEM/EDX ανάλυση της μικροδομής, του Αιγυπτιακού μπλε, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, που συντέθηκε με την μέθοδο SCS.

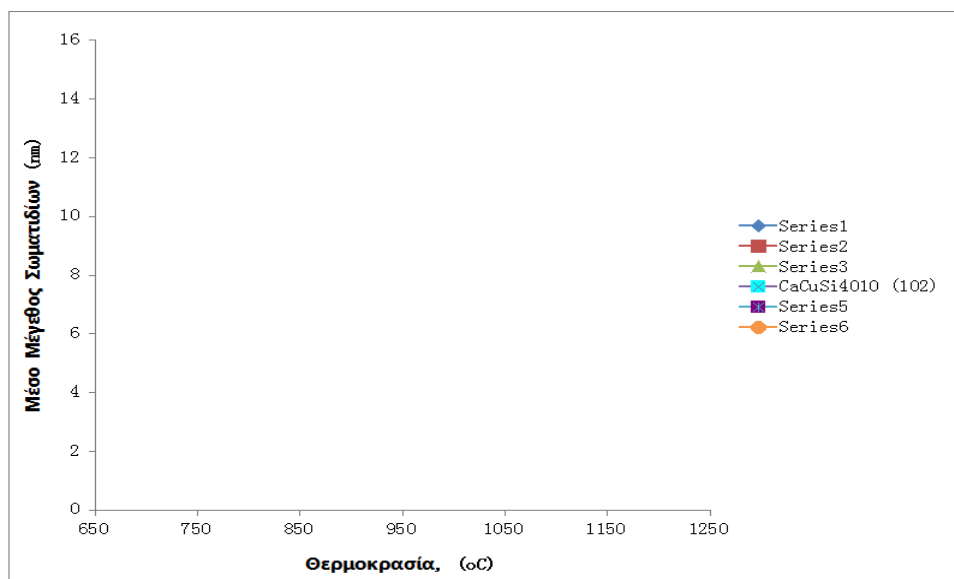
Από τις αναλύσεις με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) παρατηρήθηκε η μικροδομή των παραγόμενων χρωστικών σε υψηλές μεγεθύνσεις 500x και 1500x. Διακρίνεται το πολυκρυσταλλικό υλικό $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ που αντιστοιχεί σε συσσωματώματα λεπτόκοκκης ή χονδρόκοκκης υφής. Η μικροδομή τέτοιων

συσσωματωμάτων αποτελείται από το συγκεκριμένο πολυκρυσταλλικό υλικό καθώς και από πυριτικούς κόκκους, οι οποίοι συγκρατούνται από μικρές ποσότητες διασωματιδιακού γυαλιού δημιουργώντας τον βολαστονίτη, $\text{Na}_2\text{CaSi}_3\text{O}_8$ ή $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$. Τα αποτελέσματα των χημικών στοιχείων που εμφανίζονται και στα τέσσερα δείγματα παρουσιάζουν ομοιογένεια. Η χημική τους ανάλυση χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη των χημικών στοιχείων C, O, Na, Si, Ca, Cu. Αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς οι χημικών ενώσεων καθώς και η αναλογία αυτών ήταν με ακρίβεια προσδιορισμένη κατά την διάρκεια σύνθεσης των χρωστικών (Εικ.7).



Εικ. 8. Επίδραση της θερμοκρασίας στα αρχικά μίγματα σκόνης σχετικά με την απόσταση στα ατομικά επίπεδα [13].

Η θερμοκραία παίζει σημαντικό βαθμό στην δημιουργία των φάσεων καθώς και στην παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος.



Εικ. 9. Μέσο μέγεθος σωματιδίων (nm) [12].

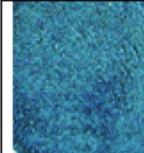


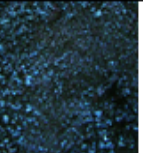
Το μέσο μέγεθος σωματιδίων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας επειδή η αντίδραση είναι πιο εξώθερμη: περισσότερο πυροσυσσωμάτωση στην διεργασία, μεγαλύτερο το μέγεθος των σωματιδίων.

Επίλογος

Με την Σύνθεση SCS παράχθηκαν νανοδομημένες αποχρώσεις της χρωστικής του Αιγυπτιακού μπλε υψηλής καθαρότητας με ομοιόμορφη κατανομή ιχνοποσοτήτων ιόντων σε κρυσταλλικό πλέγμα σε ενιαίο βήμα. Τα χρώματα του Αιγυπτιακού μπλε κυμαίνονταν σε διάφορες αποχρώσεις του μπλε χρώματος ανάλογα με το πλέγμα υποδοχής και τις γεωμετρικές συντεταγμένες.

Και οι τέσσερις δοκιμές σύνθεσης του Αιγυπτιακού μπλε που υλοποιήθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες 700 °C, 750 °C, 800 °C και 850 °C για 2 ώρες χαρακτηρίστηκαν από την δημιουργία της χρωστικής αυτής. Η αυτοσυντηρούμενη αντίδραση, SCS, πραγματοποιήθηκε σε ένα ομογενές υδατικό διάλυμα με 25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ +24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ +50,4% Na_2SiO_3 +40% Urea+3.6% H_2O . Οι παραγόμενες αποχρώσεις κυμαίνονταν από σκούρο μπλε χρώμα έως ανοικτότερο χρώμα καθώς αυξανόταν η θερμοκρασία του κλιβάνου. Αποτέλεσμα αυτό των αποχρώσεων επηρεάστηκε από το ποσοστό των νιτρικών του Cu που αντέδρασε κατά την καύση με τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία δημιουργώντας την χημική σύσταση του Αιγυπτιακού μπλε. Στην θερμοκρασία των 850 °C παρατηρήθηκε η υψηλότερη ποσοστιαία δημιουργία του Αιγυπτιακού μπλε (Εικ.7).

Το Αιγυπτιακό μπλε ως σύνθετη νανοδομημένη χρωστική παρουσιάζει μοναδικές ιδιότητες. Για παράδειγμα αντανακλά υπέρυθρες ακτίνες, όταν το κόκκινο φως πέφτει πάνω του. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι ορατό, επειδή η ανθρώπινη όραση δεν μπορεί να δεισδύσει στις υπέρυθρες ακτίνες. Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες καθιστούν το Αιγυπτιακό μπλε μια μοναδική χρωστική ουσία και για αυτό είναι ένα υλικό κατάλληλο για πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη επιστήμη, όπως οι τηλεπικοινωνίες και βιοϊατρική επιστήμη.

25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ +24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ +50,4% Na_2SiO_3 +40%Urea+3.6% H_2O T=850 °C 2 Hours	25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ +24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ +50,4% Na_2SiO_3 +40%Urea+3.6% H_2O T=800 °C 2 Hours	25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ +24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ +50,4% Na_2SiO_3 +40%Urea+3.6% H_2O T=750 °C 2 Hours	25% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ +24,6% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ +50,4% Na_2SiO_3 +40%Urea+3.6% H_2O T=700 °C 2 Hours
			

Εικ. 9. Πίνακας των παραχθέντων αποχρώσεων του Αιγυπτιακού μπλε.

Βιβλιογραφία

1. Lucas A., Harris J.R., (1989), Ancient Egyptian Materials and Industries, Histories and Mysteries of Man, London, pp. 338±366.

2. Ullrich D., (1987), Egyptian blue and green frit: characterization, history and occurrence, synthesis, PACT 17 (II.3.1), p.323–332.
1. Brown C.E., Macalister F., Wright M.M. (Eds.), (1995), Conservation in Ancient Egyptian Collections, Archetype Publication, p. 85.
3. Vitruvius, (1981), De architectura libri decem, Buch VII, Kap. 11, 181 (ed. Fensterbusch). Darmstadt: Wiss. Buchges.
2. Tite M.S., Binson M., Cowell M.R., (1984), Technological examination of Egyptian blue, in: J.B. Lambert(Ed.), Archaeological Chemistry, vol. 3, Washington American Chemical Society, pp. 215.
3. Jaksch H., Seipel W., Weiner K.L., Goresy A.El., (1983), Naturwissenschaften 70, p.525.
4. Schiegle S., Weiner K.L., A. El Goresy, (1989), Goresy, Naturwissenschaften 76.
5. Bianchetti P., Talarico F., Vigliano M.G., Ali M.F., (2000), Production and characterization of Egyptian blue and Egyptian green frit, Journal of Cultural Heritage 1, p.179–188.
6. Baraldi P., Bondioli F., Fagnano C., Ferrari A.M., Tinti A., Vinella M., (2001), Study of the vibrational spectrum of cuprorivaite, Annali di Chimica 91, p.679–692.
7. <http://eprints.iisc.ernet.in/14898/1/fulltext.pdf>
8. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748906000642>
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Scherrer_equation
10. https://en.wikipedia.org/wiki/Bragg%27s_law