

## Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

Tuba DEMİR<sup>1\*</sup>, Muhammed ULUCAN<sup>2</sup>, Kürşat Esat ALYAMAÇ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>2,3</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*1</sup> t.demir@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mulucan@firat.edu.tr, <sup>3</sup> kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17/07/2021;

Kabul/Accepted: 02/12/2021)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı çevre dostu yüksek dayanımlı betonların (ÇYDB) taze beton özellikleri ve erken yaş beton dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel modeller geliştirmek, pratik bir karışım hesabı sunmaktır. Bu amaçla 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Bu seriler hazırlanırken su/çimento (W/C) oranları 0.20-0.25-0.30, çimento dozajı ise 400-450-500 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir. Hazırlanan beton karışımlarında mineral katkı olarak silis dumanı ve mermer tozu kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agrega ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu karışım oranları sonucunda elde edilen veriler tepki yüzeyi metodu (RSM) kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler yapılırken değişken olarak W/C, agrega/çimento (A/C) ve mermer tozu/ince agrega (MP/FA) değerleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda slump ve  $f_c-3$  gün değerlerini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelin etkinliğini test etmek için 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serileri üzerinde deney sonuçları ile modelin tahmin sonuçları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar sonucunda bağıl hata oranları (BHO) hesaplanmıştır. Geliştirilen modelin slump ve  $f_c-3$  gün değerlerini oldukça yüksek doğrulukla tahmin ettiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek Dayanımlı Beton, Erken Yaş Beton Dayanımı, Mermer Tozu, Silis Dumanı, RSM.

### Determination of the Early Age Strength of High-Strength Concrete Using RSM Method

**Abstract:** This study aims to develop mathematical models to predict the fresh concrete and early age strength properties of environmentally friendly high-strength concretes (EHSC) with high accuracy and to present a practical mix design. For this purpose, 72 series of concrete mixtures were prepared. While preparing these series, water-to-cement (W/C) ratios were selected as 0.20-0.25-0.30, and cement dosage as 400-450-500 kg/m<sup>3</sup>. Silica fume and marble powder were used as mineral additives in the prepared concrete mixtures. Silica fume was used by displacing it with cement at 5-10-15% by volume. Marble powder was used by displacing it with fine aggregate at 8-10-12% by volume. These mix ratios were analyzed using the response surface methodology (RSM). W/C, aggregate-to-cement (A/C) and marble powder-to-fine aggregate (MP/FA) ratios were used as variables during the analysis. As a result of the analysis, a mathematical models was developed for each of slump flow and  $f_c-3$  days, 9 control series were prepared to test the effectiveness of these developed models. The results of the experiments and the estimation results of the models were compared on these control series. Absolute relative deviation (ARD) were calculated as a result of these comparisons. It was observed that the developed models detected the slump flow and  $f_c-3$  days values with high accuracy.

**Key words:** High Strength Concrete, Early Age Concrete Strength, Marble Powder, Silica Fume, RSM.

### 1. Giriş

Yüksek Dayanımlı Betonların (YDB), basınç dayanımı ve durabilite gibi mühendislik özellikleri sebebiyle kullanım alanları giderek yaygınlaşmıştır. YDB, ortalama basınç dayanımı 50 MPa ve üstü olan özel beton türüdür [1]. 1970'li yılların başında İnşaat Mühendisliği literatürüne girmiştir [2]. YDB'lerin uygulama alanlarında yaygın olarak yüksek katlı yapılar, köprüler, açık deniz platformları, yollar, tüneller gibi uzun dönem performans istenen yapılar bulunmaktadır. Bu beton türünün dayanımı, dayanıklılığı ve kompasitesi yüksektir [3,4]. Malzeme teknolojisinin de gelişimi ile birlikte YDB üretimi popülerlik kazanmıştır. Dahası çeşitli endüstriyel atıklar kullanılarak yüksek dayanımlı beton (YDB) üretimi ile ilgili çalışmalar daha popüler hale gelmiştir. Endüstriyel atıklar kullanılarak elde edilen YDB'ler; yüksek dayanım ve durabilite açısından inşaat sektörüne, CO<sub>2</sub> salımının azaltılması ile çevreye ve atık malzemelerin kullanılması ile ekonomiye olumlu katkı sağlamaktadır.

\* Sorumlu yazar: [t.demir@firat.edu.tr](mailto:t.demir@firat.edu.tr). <sup>1</sup> 0000-0003-2092-1029, <sup>2</sup> 0000-0001-7629-6846, <sup>3</sup> 0000-0002-3226-4073

Beton üretiminde temel unsurlardan biri agregadır. İnşaat sektörünün hızla ilerlemesiyle, bu malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır [5]. Bu yüzden beton karışımlarda agregayla yer değiştirilerek kullanılan mermer tozu vb. atıkların kullanımı yaygınlaşmıştır [6]. Mermer tozunun betonda kullanılması ile betonun boşluk oranı azalmakta ve daha yüksek kompasiteye sahip beton elde edilmektedir [7]. Dolayısıyla mermer tozu betonda filler etkisi oluşturmaktadır [6,7].

YDB üretiminde yaygın olarak silis dumanı kullanılmaktadır [10]. Silis dumanının beton basınç dayanımına katkı sağladığı birçok çalışmada mevcuttur. Ancak silis dumanı ve mermer tozunun birlikte kullanıldığı çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın genel amaçlarından birincisi, atık malzeme olan mermer tozunun betonda kullanılarak, doğal kaynakların kullanımının azaltılmasına katkı sağlamaktır. İkicisi, yüksek dayanıma sahip betonların erken yaş dayanımlarını, istatistik analiz metodu kullanarak yüksek doğrulukla tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için matematiksel model geliştirmektir. Bunun için 72 seri YDB karışımı hazırlanmıştır. Bu seriler hazırlanırken W/C oranları 0.20-0.25-0.30, çimento dozajı ise 400-450-500 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir. Hazırlanan beton karışımlarında mineral katkı olarak silis dumanı ve mermer tozu kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agregaya ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu karışım oranları sonucunda elde edilen veriler RSM kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler yapılırken değişken olarak W/C, A/C ve MP/FA değerleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda slump ve  $f_c$ -3 gün değerinin her biri için üç farklı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modellerin etkinliğini test etmek için 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serileri üzerinde deney sonuçları ile modellerin tahmin sonuçları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar sonucunda bağıl hata değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen modelin slump değerini ve  $f_c$ -3 gün değerlerini oldukça yüksek doğrulukla tespit ettiği görülmüştür.

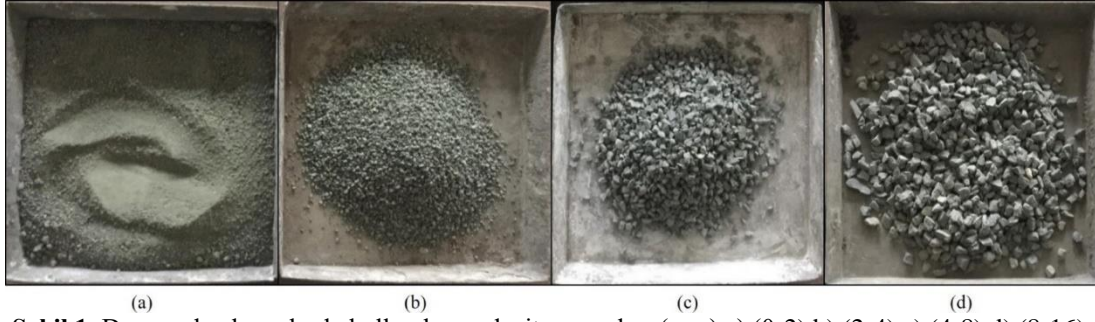
## 2. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada Elazığ Seza çimento fabrikasından temin edilen, CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento türü, TS EN 197-1 standardına uygun olup 28 günlük basınç dayanımı 48.3 MPa' dır [11]. Mineral katkı maddesi olarak mermer tozu ve silis dumanı kullanılmıştır. Mermer tozu, Elazığ organize sanayi bölgesinden temin edilmiştir. Silis dumanı (mikro silika) Antalya Eti Metalurji'den temin edilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (%).

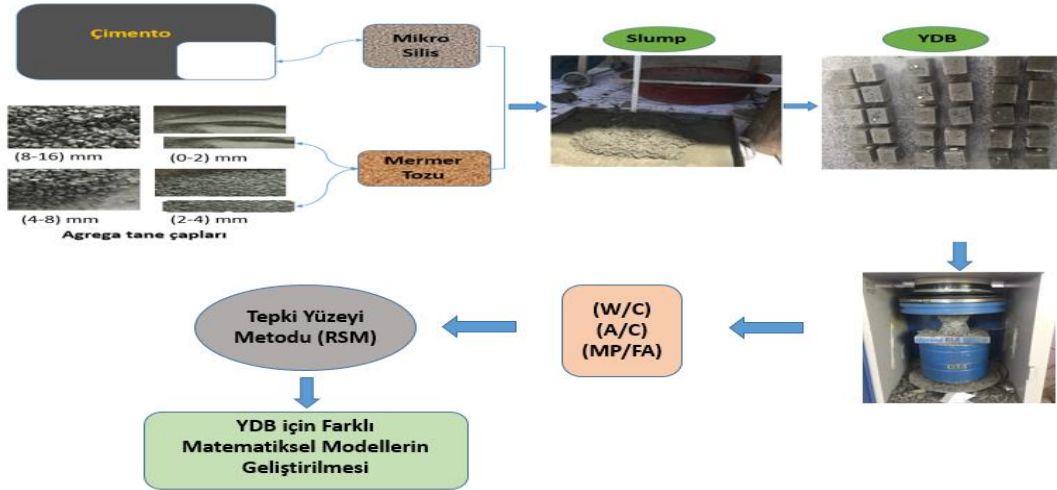
| Kimyasal Özellikler                | Çimento (C) | Silis Dumanı (SD) | Mermer Tozu (MT) |
|------------------------------------|-------------|-------------------|------------------|
| CaO                                | 63.19       | 0.40              | 40.45            |
| SiO <sub>2</sub>                   | 19.07       | 94.10             | 28.35            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 3.72        | 1.50              | 9.70             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 4.82        | 0.90              | 0.17             |
| SiO <sub>3</sub>                   | 2.94        | 94.10             | 0.02             |
| Na <sub>2</sub> O                  | 0.39        | 0.40              | 0.05             |
| K <sub>2</sub> O                   | 0.62        | 0.90              | 0.01             |
| MgO                                | 1.83        | 0.10              | 16.25            |
| Cl                                 | 0.0101      | -                 | -                |
| Çözünmeyen kalıntı                 | 0.56        | -                 | -                |
| Kızdırma kaybı                     | 3.43        | -                 | 4.84             |
| <b>Fiziksel Özellikler</b>         |             |                   |                  |
| Özgül yüzey (Blaine)               | 3838        |                   | 3920             |
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3.13        | 2.20              | 2.71             |
| Priz başlangıcı (dk)               | 135         | -                 | -                |
| Priz sonu (dk)                     | 215         | -                 | -                |
| Hacim sabitliği (mm)               | 1           | -                 | -                |

Beton karışımlarında yüksek kompasite ve dayanıma sahip andezit agregası kullanılmıştır. Bu agregaya türü, koyu renkli, emici olmayan, dağılmayan ve yoğun dokusu nedeniyle yüksek mukavemetli betonlar için uygundur. Aynı zamanda % 52-63 oranında kuvars içeren bir agregaya türüdür [12]. Deneysel çalışmalarda kullanılan maksimum agregaya tane çapı 16 mm olup, agregalar 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm olarak 4 farklı gruba ayrılmıştır. Elek sınıflarına göre ayrılmış agregalar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan andezit agregaları (mm) a) (0-2) b) (2-4) c) (4-8) d) (8-16).

Mineral katkı olarak silis dumanı çimento ile mermer tozu ise ince agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Tüm karışımlarda, kimyasal katkı malzemesi olarak hiper akışkanlaştırıcı CHRYSO Fluid 518 kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agrega ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışmayı özetleyen akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın akış şeması

## 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde farklı karışım oranlarına sahip 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Karışımlara ait veriler Tablo 2'de verilmiştir. Karışımlar sonucunda üretilen numuneler üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için slump deneyleri uygulanmış ve slump değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra üretilen numuneler 100x100x100 mm'lik kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna bırakılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerini tespit etmek amacıyla numuneler kür havuzundan çıkarılmış, numunelere 3. günde standart basınç dayanımı testi uygulanmış ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı, slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak RSM yardımıyla analizleri yapılmış ve matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan analizlere ait detaylı bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Beton karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>).

| Seri Adı  | Çimento | Su | Mikro silis | Mermer Tozu | İnce Agrega (0-2) mm | İnce Agrega (2-4) mm | Orta Agrega (4-8) mm | Kaba Agrega (8-16) mm |
|-----------|---------|----|-------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| ÇYDB400-1 | 380     | 80 | 14.1        | 83          | 577                  | 380                  | 411                  | 615                   |
| ÇYDB400-2 | 380     | 80 | 14.1        | 104         | 564                  | 372                  | 411                  | 615                   |
| ÇYDB400-3 | 380     | 80 | 14.1        | 125         | 552                  | 363                  | 411                  | 615                   |
| ÇYDB400-4 | 360     | 80 | 28.1        | 82          | 571                  | 376                  | 406                  | 609                   |
| ÇYDB400-5 | 360     | 80 | 28.1        | 103         | 559                  | 368                  | 406                  | 609                   |
| ÇYDB400-6 | 360     | 80 | 28.1        | 124         | 546                  | 360                  | 406                  | 609                   |

Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

|            |     |     |      |     |     |     |      |     |
|------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|
| CYDB400-7  | 340 | 80  | 42.2 | 82  | 565 | 372 | 402  | 603 |
| CYDB400-8  | 340 | 80  | 42.2 | 102 | 553 | 364 | 402  | 603 |
| CYDB400-9  | 340 | 80  | 42.2 | 122 | 541 | 356 | 402  | 603 |
| CYDB400-10 | 380 | 100 | 14.1 | 81  | 562 | 370 | 400  | 599 |
| CYDB400-11 | 380 | 100 | 14.1 | 101 | 550 | 362 | 400  | 599 |
| CYDB400-12 | 380 | 100 | 14.1 | 122 | 537 | 354 | 400  | 599 |
| CYDB400-13 | 360 | 100 | 28.1 | 80  | 556 | 366 | 395  | 593 |
| CYDB400-14 | 360 | 100 | 28.1 | 100 | 544 | 358 | 395  | 593 |
| CYDB400-15 | 360 | 100 | 28.1 | 120 | 532 | 350 | 395  | 593 |
| CYDB400-16 | 340 | 100 | 42.2 | 79  | 550 | 362 | 391  | 587 |
| CYDB400-17 | 340 | 100 | 42.2 | 99  | 538 | 355 | 391  | 587 |
| CYDB400-18 | 340 | 100 | 42.2 | 119 | 526 | 347 | 391  | 587 |
| CYDB400-19 | 380 | 120 | 14.1 | 79  | 547 | 360 | 389  | 583 |
| CYDB400-20 | 380 | 120 | 14.1 | 99  | 535 | 352 | 389  | 583 |
| CYDB400-21 | 380 | 120 | 14.1 | 118 | 523 | 344 | 389  | 583 |
| CYDB400-22 | 360 | 120 | 28.1 | 78  | 541 | 356 | 385  | 577 |
| CYDB400-23 | 360 | 120 | 28.1 | 117 | 517 | 341 | 385  | 577 |
| CYDB400-24 | 340 | 120 | 42.2 | 77  | 535 | 352 | 381  | 571 |
| CYDB400-25 | 340 | 120 | 42.2 | 116 | 512 | 337 | 381  | 571 |
| CYDB450-1  | 428 | 90  | 15.8 | 80  | 557 | 367 | 396  | 594 |
| CYDB450-2  | 428 | 90  | 15.8 | 100 | 545 | 359 | 396  | 594 |
| CYDB450-3  | 428 | 90  | 15.8 | 120 | 532 | 351 | 396  | 594 |
| CYDB450-4  | 405 | 90  | 31.6 | 79  | 550 | 362 | 391  | 587 |
| CYDB450-5  | 405 | 90  | 31.6 | 119 | 526 | 346 | 391  | 587 |
| CYDB450-6  | 383 | 90  | 47.4 | 78  | 544 | 358 | 387  | 580 |
| CYDB450-7  | 383 | 90  | 47.4 | 98  | 532 | 350 | 387  | 580 |
| CYDB450-8  | 383 | 90  | 47.4 | 118 | 520 | 342 | 3867 | 580 |
| CYDB450-9  | 428 | 113 | 15.8 | 78  | 540 | 355 | 384  | 576 |
| CYDB450-10 | 428 | 113 | 15.8 | 97  | 528 | 348 | 384  | 576 |
| CYDB450-11 | 405 | 113 | 31.6 | 77  | 533 | 351 | 379  | 569 |
| CYDB450-12 | 405 | 113 | 31.6 | 115 | 510 | 336 | 379  | 569 |
| CYDB450-13 | 383 | 113 | 47.4 | 76  | 526 | 347 | 374  | 562 |
| CYDB450-14 | 383 | 113 | 47.4 | 95  | 515 | 339 | 374  | 562 |
| CYDB450-15 | 383 | 113 | 47.4 | 114 | 504 | 332 | 374  | 562 |
| CYDB450-16 | 428 | 135 | 15.8 | 75  | 523 | 344 | 372  | 557 |
| CYDB450-17 | 428 | 135 | 15.8 | 94  | 511 | 337 | 372  | 557 |
| CYDB450-18 | 428 | 135 | 15.8 | 113 | 500 | 329 | 372  | 557 |
| CYDB450-19 | 405 | 135 | 31.6 | 74  | 516 | 340 | 367  | 550 |
| CYDB450-20 | 405 | 135 | 31.6 | 112 | 494 | 325 | 367  | 550 |
| CYDB450-21 | 383 | 135 | 47.4 | 74  | 509 | 336 | 362  | 543 |
| CYDB450-22 | 383 | 135 | 47.4 | 92  | 498 | 328 | 362  | 543 |
| CYDB450-23 | 383 | 135 | 47.4 | 110 | 487 | 321 | 362  | 543 |
| CYDB500-1  | 475 | 100 | 17.6 | 77  | 536 | 353 | 381  | 572 |
| CYDB500-2  | 475 | 100 | 17.6 | 97  | 525 | 345 | 381  | 572 |
| CYDB500-3  | 475 | 100 | 17.6 | 116 | 513 | 338 | 381  | 572 |
| CYDB500-4  | 450 | 100 | 35.1 | 76  | 529 | 348 | 376  | 564 |
| CYDB500-5  | 450 | 100 | 35.1 | 95  | 517 | 341 | 376  | 564 |
| CYDB500-6  | 450 | 100 | 35.1 | 114 | 506 | 333 | 376  | 564 |
| CYDB500-7  | 425 | 100 | 52.7 | 75  | 522 | 344 | 371  | 556 |
| CYDB500-8  | 425 | 100 | 52.7 | 94  | 510 | 336 | 371  | 556 |
| CYDB500-9  | 425 | 100 | 52.7 | 113 | 499 | 329 | 371  | 556 |
| CYDB500-10 | 475 | 125 | 17.6 | 75  | 517 | 341 | 368  | 552 |
| CYDB500-11 | 475 | 125 | 17.6 | 93  | 506 | 333 | 368  | 552 |
| CYDB500-12 | 450 | 125 | 35.1 | 74  | 510 | 336 | 363  | 544 |
| CYDB500-13 | 450 | 125 | 35.1 | 110 | 488 | 321 | 363  | 544 |
| CYDB500-14 | 425 | 125 | 52.7 | 73  | 503 | 331 | 358  | 536 |
| CYDB500-15 | 425 | 125 | 52.7 | 91  | 492 | 324 | 358  | 536 |
| CYDB500-16 | 425 | 125 | 52.7 | 109 | 481 | 317 | 358  | 536 |
| CYDB500-17 | 475 | 150 | 17.6 | 72  | 498 | 328 | 354  | 532 |
| CYDB500-18 | 475 | 150 | 17.6 | 90  | 488 | 321 | 354  | 532 |
| CYDB500-19 | 475 | 150 | 17.6 | 108 | 477 | 314 | 354  | 532 |
| CYDB500-20 | 450 | 150 | 35.1 | 71  | 491 | 324 | 349  | 524 |
| CYDB500-21 | 450 | 150 | 35.1 | 106 | 470 | 309 | 349  | 524 |
| CYDB500-22 | 425 | 150 | 52.7 | 70  | 484 | 319 | 344  | 516 |
| CYDB500-23 | 425 | 150 | 52.7 | 87  | 473 | 312 | 344  | 516 |
| CYDB500-24 | 425 | 150 | 52.7 | 105 | 463 | 305 | 344  | 516 |
| KÇYDB-1    | 360 | 120 | 28.1 | 98  | 529 | 349 | 385  | 577 |
| KÇYDB-2    | 340 | 120 | 42.2 | 97  | 523 | 345 | 381  | 571 |
| KÇYDB-3    | 405 | 90  | 31.6 | 99  | 538 | 354 | 391  | 587 |
| KÇYDB-4    | 428 | 113 | 15.8 | 117 | 516 | 340 | 384  | 576 |
| KÇYDB-5    | 405 | 113 | 31.6 | 96  | 521 | 343 | 379  | 569 |
| KÇYDB-6    | 405 | 135 | 31.6 | 93  | 505 | 332 | 367  | 550 |
| KÇYDB-7    | 475 | 125 | 17.6 | 112 | 495 | 326 | 368  | 552 |
| KÇYDB-8    | 450 | 125 | 35.1 | 92  | 499 | 329 | 363  | 544 |
| KÇYDB-9    | 450 | 150 | 35.1 | 89  | 480 | 316 | 349  | 524 |

### 3. İstatistik Analiz

#### 3.1. Modelin Tasarımı

Yanıt yüzeyi yöntemi, değişkenler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi belirlemede etkili bir araç olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [13]. Ayrıca bu yöntemle geliştirilen modeller, değişkenlerin bireysel etkilerini ve değişkenlerin yanıt değişkeni üzerindeki etkileşimini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bir RSM modeli geliştirmek, üç ana adımı içerir. Bunlar; ilgilenilen yanıtın deneysel verilerini toplamak, bir RSM modeli oluşturmak ve doğruluğunu onaylamak, son olarak, istenen yanıt değişkenlerini hesaplamak için değişkenleri optimize etmektir [14]. RSM'nin, her yanıt için modeli tahmin etme, az sayıda deneysel veri noktasıyla sağlam bir model oluşturma, değişkenler arasındaki etkileşimini değerlendirme ve en uygun yanıtı bulma gibi çeşitli avantajları vardır [15].

Bu çalışmada model geliştirilirken kullanılan değişkenler su/çimento (W/C), agrega/çimento (A/C), ve mermer tozu/ince agrega (MP/FA) oranlarıdır. W/C ve A/C oranı betonun dayanımı ve işlenebilirliği üzerinde önemli etkiye sahiptir [16]. Dolayısıyla W/C ve A/C oranları değişken olarak kesinlikle dikkate alınmalıdır. Bunlara ek olarak, mermer tozunun kullanımıyla betonun boşluk oranı azalmaktadır. Yani, dolgu özelliği nedeniyle basınç dayanımını arttırmaktadır [2]. Ancak optimum değerden sonra dayanım değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır [8]. Bu çalışmada mermer tozu ile ince agrega hacimce yer değiştirilmiş ve bu nedenle MP/FA oranı da değişken olarak dikkate alınmalıdır. Mermer tozunun inceliği yüksek olduğundan slump değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. Değişkenler, basınç dayanımı, ve slump üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenerek belirlenmiştir. Bu değişkenlere ait değişim aralıkları Tablo 3'te sunulmuştur. Çalışmada kullanılan değişkenlerin düşük değerleri -1, yüksek değerleri ise +1 olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda 0 olarak belirtilen değer ise düşük ve yüksek değerlerin aritmetik ortalamasıdır.

**Tablo 3.** Değişkenler ve varyasyon aralığı

| Semboller |     | Değişim Aralıkları |       |       |
|-----------|-----|--------------------|-------|-------|
| Gerçek    | Kod | -1                 | 0     | 1     |
| W/C       | A   | 0.21               | 0.28  | 0.35  |
| A/C       | B   | 3.53               | 4.62  | 5.71  |
| MP/FA     | C   | 0.087              | 0.112 | 0.136 |

#### 3.2. Modelin Geliştirilmesi

Bu çalışmada, toplam 72 veriye sahip bir RSM modeli oluşturulmuştur. Deneysel tasarım ve analiz için piyasada bulunan bir yazılım paketi (Design Expert) kullanılmıştır [17]. Yapılan analizlerde kullanılan değişkenlere ve yanıtlara ait değerler Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda karışım kodlarına isimler verilirken, ÇYDB değerleri çevre dostu yüksek dayanımlı betonu, 400-450-500 çimento dozajı olarak verilen değerler ve sağda verilen numaralar ise hazırlanan seri numarasına göstermektedir. Ayrıca KÇYDB kodları, kontrol çevre dostu yüksek dayanımlı betonu, sağda verilen numaralar ise hazırlanan seri numarasını belirtir.

**Tablo 4.** Analizde kullanılan yanıtlar ve değişkenlere ait değerler.

| Karışım Kodu | W/C  | A/C  | MP/FA | Slump (cm) | f <sub>c</sub> -3 gün (MPa) |
|--------------|------|------|-------|------------|-----------------------------|
| CYDB400-1    | 0.21 | 5.22 | 0.087 | 4          | 51.3                        |
| CYDB400-2    | 0.21 | 5.16 | 0.111 | 3          | 53.4                        |
| CYDB400-3    | 0.21 | 5.11 | 0.136 | 2          | 52.6                        |
| CYDB400-4    | 0.22 | 5.45 | 0.087 | 3          | 52.7                        |
| CYDB400-5    | 0.22 | 5.39 | 0.111 | 2          | 54.3                        |
| CYDB400-6    | 0.22 | 5.34 | 0.136 | 2          | 53.4                        |
| CYDB400-7    | 0.24 | 5.71 | 0.087 | 2          | 53.3                        |
| CYDB400-8    | 0.24 | 5.65 | 0.111 | 1          | 55.0                        |
| CYDB400-9    | 0.24 | 5.59 | 0.136 | 1          | 54.1                        |
| CYDB400-10   | 0.26 | 5.08 | 0.087 | 8          | 55.7                        |
| CYDB400-11   | 0.26 | 5.03 | 0.111 | 7          | 56.9                        |
| CYDB400-12   | 0.26 | 4.97 | 0.136 | 6          | 56.3                        |
| CYDB400-13   | 0.28 | 5.31 | 0.087 | 7          | 56.5                        |
| CYDB400-14   | 0.28 | 5.25 | 0.111 | 6          | 58.1                        |
| CYDB400-15   | 0.28 | 5.20 | 0.136 | 6          | 57.3                        |
| CYDB400-16   | 0.29 | 5.56 | 0.087 | 6          | 56.3                        |
| CYDB400-17   | 0.29 | 5.50 | 0.111 | 5          | 57.7                        |

Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

|            |      |      |       |    |      |
|------------|------|------|-------|----|------|
| CYDB400-18 | 0.29 | 5.44 | 0.136 | 5  | 57.1 |
| CYDB400-19 | 0.32 | 4.94 | 0.087 | 14 | 54.6 |
| CYDB400-20 | 0.32 | 4.89 | 0.111 | 13 | 55.7 |
| CYDB400-21 | 0.32 | 4.84 | 0.136 | 12 | 55.0 |
| CYDB400-22 | 0.33 | 5.16 | 0.087 | 13 | 53.0 |
| CYDB400-23 | 0.33 | 5.05 | 0.136 | 10 | 54.4 |
| CYDB400-24 | 0.35 | 5.41 | 0.087 | 12 | 50.7 |
| CYDB400-25 | 0.35 | 5.29 | 0.136 | 11 | 51.0 |
| CYDB450-1  | 0.21 | 4.47 | 0.087 | 6  | 53.9 |
| CYDB450-2  | 0.21 | 4.43 | 0.111 | 4  | 55.1 |
| CYDB450-3  | 0.21 | 4.38 | 0.136 | 3  | 54.4 |
| CYDB450-4  | 0.22 | 4.67 | 0.087 | 5  | 54.9 |
| CYDB450-5  | 0.22 | 4.57 | 0.136 | 2  | 55.5 |
| CYDB450-6  | 0.24 | 4.88 | 0.087 | 2  | 55.8 |
| CYDB450-7  | 0.24 | 4.83 | 0.111 | 1  | 57.4 |
| CYDB450-8  | 0.24 | 4.78 | 0.136 | 1  | 56.4 |
| CYDB450-9  | 0.26 | 4.34 | 0.087 | 12 | 57.9 |
| CYDB450-10 | 0.26 | 4.29 | 0.111 | 10 | 58.9 |
| CYDB450-11 | 0.28 | 4.52 | 0.087 | 11 | 59.4 |
| CYDB450-12 | 0.28 | 4.43 | 0.136 | 8  | 60.0 |
| CYDB450-13 | 0.29 | 4.73 | 0.087 | 9  | 58.6 |
| CYDB450-14 | 0.29 | 4.68 | 0.111 | 7  | 59.8 |
| CYDB450-15 | 0.29 | 4.63 | 0.136 | 7  | 59.1 |
| CYDB450-16 | 0.32 | 4.20 | 0.087 | 18 | 57.0 |
| CYDB450-17 | 0.32 | 4.16 | 0.111 | 16 | 58.0 |
| CYDB450-18 | 0.32 | 4.11 | 0.136 | 16 | 57.4 |
| CYDB450-19 | 0.33 | 4.38 | 0.087 | 17 | 55.7 |
| CYDB450-20 | 0.33 | 4.29 | 0.136 | 14 | 56.1 |
| CYDB450-21 | 0.35 | 4.58 | 0.087 | 15 | 52.5 |
| CYDB450-22 | 0.35 | 4.53 | 0.111 | 13 | 53.6 |
| CYDB450-23 | 0.35 | 4.48 | 0.136 | 13 | 52.8 |
| CYDB500-1  | 0.21 | 3.88 | 0.087 | 9  | 56.0 |
| CYDB500-2  | 0.21 | 3.84 | 0.111 | 7  | 57.5 |
| CYDB500-3  | 0.21 | 3.80 | 0.136 | 6  | 56.6 |
| CYDB500-4  | 0.22 | 4.04 | 0.087 | 8  | 57.3 |
| CYDB500-5  | 0.22 | 4.00 | 0.111 | 6  | 58.9 |
| CYDB500-6  | 0.22 | 3.95 | 0.136 | 5  | 57.7 |
| CYDB500-7  | 0.24 | 4.22 | 0.087 | 4  | 58.6 |
| CYDB500-8  | 0.24 | 4.17 | 0.111 | 3  | 59.9 |
| CYDB500-9  | 0.24 | 4.13 | 0.136 | 3  | 59.0 |
| CYDB500-10 | 0.26 | 3.74 | 0.087 | 17 | 59.9 |
| CYDB500-11 | 0.26 | 3.70 | 0.111 | 16 | 60.8 |
| CYDB500-12 | 0.28 | 3.89 | 0.087 | 16 | 61.6 |
| CYDB500-13 | 0.28 | 3.81 | 0.136 | 13 | 62.2 |
| CYDB500-14 | 0.29 | 4.06 | 0.087 | 15 | 60.6 |
| CYDB500-15 | 0.29 | 4.02 | 0.111 | 13 | 61.7 |
| CYDB500-16 | 0.29 | 3.98 | 0.136 | 12 | 61.3 |
| CYDB500-17 | 0.32 | 3.61 | 0.087 | 23 | 58.6 |
| CYDB500-18 | 0.32 | 3.57 | 0.111 | 21 | 59.9 |
| CYDB500-19 | 0.32 | 3.53 | 0.136 | 20 | 59.2 |
| CYDB500-20 | 0.33 | 3.75 | 0.087 | 22 | 57.6 |
| CYDB500-21 | 0.33 | 3.67 | 0.136 | 19 | 58.1 |
| CYDB500-22 | 0.35 | 3.91 | 0.087 | 18 | 54.4 |
| CYDB500-23 | 0.35 | 3.87 | 0.111 | 18 | 55.7 |
| CYDB500-24 | 0.35 | 3.83 | 0.136 | 17 | 55.1 |
| KCYDB-1    | 0.33 | 5.11 | 0.111 | 11 | 55.0 |
| KCYDB-2    | 0.35 | 5.35 | 0.111 | 11 | 51.5 |
| KCYDB-3    | 0.22 | 4.62 | 0.111 | 3  | 56.5 |
| KCYDB-4    | 0.26 | 4.25 | 0.136 | 10 | 58.5 |
| KCYDB-5    | 0.28 | 4.47 | 0.111 | 9  | 60.7 |
| KCYDB-6    | 0.33 | 4.33 | 0.111 | 15 | 56.9 |
| KCYDB-7    | 0.26 | 3.66 | 0.136 | 15 | 60.2 |
| KCYDB-8    | 0.28 | 3.85 | 0.111 | 14 | 62.9 |
| KCYDB-9    | 0.33 | 3.71 | 0.111 | 20 | 58.7 |

Değişkenlerin ÇYDB'ler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model geliştirilirken  $W/C$ ,  $A/C$  ve  $MP/FA$  değişkenleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen modeldeki önemsiz terimler, model üzerinde t testi yapılarak kaldırılmıştır. Son olarak, model kalan değerlere göre oluşturulmuştur. Modelin yeterliliğini doğrulamak için temel olarak P değerleri ve F değerleri kullanılmaktadır. Bu değerleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Modellere ait ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

**Tablo 5.** Modele ait ANOVA sonuçları.

| Sonuç              | Model |         |          |
|--------------------|-------|---------|----------|
|                    | MSE   | F-value | P-value  |
| Slump (cm)         | 262.4 | 80.55   | < 0.0001 |
| $f_c$ -3 gün (MPa) | 53.5  | 91.73   | < 0.0001 |

Bu çalışmada, slump ve  $f_c$ -3 gün değerlerini tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Slump ve  $f_c$ -3 gün için geliştirilen modele ait MSE değerleri sırasıyla 262.4-53.5, belirlilik katsayıları ( $R^2$ ) ise 0.90-0.92'dir. Belirlilik katsayıları arttıkça modelin tahmin gücü giderek artmakta ve MSE değerleri giderek azalmaktadır. Aynı zamanda modelin yeterliliğini doğrulamak için kullanılan F-value değerleri de slump ve  $f_c$ -3 gün için sırasıyla 80.55-91.73'dir. Buradan da modelin belirlilik katsayısı arttıkça F-value değerinin arttığı da görülmektedir. Ayrıca, geliştirilen modelin P-value değerinin de <0.0001 olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu bir kez daha göstermektedir.

Modelin anlamlı ve değerli olduğu belirlendikten sonra, her değişkenin yanıtlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Her değişkenin önemi, analiz sonucunda elde edilen P değerine bağlıdır. Modelde kullanılan değişkenler, P değerinin genellikle 0.05'in altında olup olmadığı dikkate alınarak belirlenmiştir. Değişkenlere ait P değerleri, terimlerin anlamlı olduğunu ve katkılarının modeli iyileştirdiğini göstermektedir. Geliştirilen modele ait katsayılar ve ilgili P değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

**Tablo 6.** Modelin analiz sonuçları

| Model Terms    | Slump       |         | $f_c$ -3 gün |         |
|----------------|-------------|---------|--------------|---------|
|                | Coefficient | P-value | Coefficient  | P-value |
| A              | 239.3       | <0.0001 | 554.97       | 0.0008  |
| B              | -26.59      | <0.0001 | -4.35        | <0.0001 |
| C              | -378.45     | <0.0001 | 329.03       | 0.0504  |
| AB             | -14.31      | 0.0743  | 5.67         | 0.0784  |
| AC             | -           | -       | -            | -       |
| BC             | 28.49       | 0.0940  | -            | -       |
| A <sup>2</sup> | -159.9      | 0.1608  | -1049.97     | <0.0001 |
| B <sup>2</sup> | 2.41        | 0.0006  | -            | -       |
| C <sup>2</sup> | 864.95      | 0.2703  | -1437.59     | <0.0001 |
| Constant       | 60.62       | -       | -19.7        | -       |

## 4. Sonuçlar ve Tartışma

### 4.1. ÇYDB'nin Taze Beton Özellikleri

Bu çalışmada ÇYDB'lerin taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemek için 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden alınan verilerle yapılan analizler sonucunda matematiksel bir model geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen modelin doğruluğunu test etmek amacıyla 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serilerine ait slump değerleri ile modelin tahmin ettiği slump değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda modele ait BHO hesaplanmıştır. BHO değerleri, Denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{BHO (\%)} = \frac{\text{Deney} - \text{Model}}{\text{Deney}} \times 100 \quad (1)$$

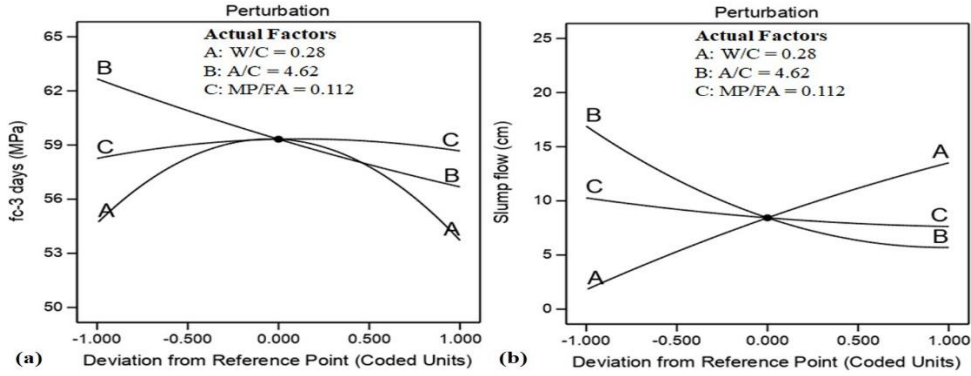
Geliştirilen modelin tahmin ettiği slump ve BHO değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Geliştirilen model dikkate alındığında slump değerlerine ait BHO değerlerinin çoğu %10'un altında kalmaktadır. Böylece, geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

**Table 7.** Geliştirilen modele ait deney sonuçları

| Sonuçlar              | Karışım kodu | Deney | Model | ARD (%) |
|-----------------------|--------------|-------|-------|---------|
| Slump<br>(cm)         | YDB-1        | 11    | 10.1  | 8.3     |
|                       | YDB-2        | 11    | 10.4  | 5.4     |
|                       | YDB-3        | 3     | 3.0   | -1.6    |
|                       | YDB-4        | 10    | 8.0   | 19.8    |
|                       | YDB-5        | 9     | 9.0   | -0.2    |
|                       | YDB-6        | 15    | 14.3  | 4.5     |
|                       | YDB-7        | 15    | 12.3  | 17.7    |
|                       | YDB-8        | 14    | 13.6  | 3.1     |
|                       | YDB-9        | 20    | 19.8  | 1.0     |
| $f_c$ -3 gün<br>(MPa) | YDB-1        | 55    | 54.9  | 0.2     |
|                       | YDB-2        | 51.5  | 51.7  | -0.5    |
|                       | YDB-3        | 56.5  | 56.2  | 0.5     |
|                       | YDB-4        | 58.5  | 59.6  | -1.9    |
|                       | YDB-5        | 60.7  | 59.7  | 1.6     |
|                       | YDB-6        | 56.9  | 56.7  | 0.4     |
|                       | YDB-7        | 60.2  | 61.5  | -2.1    |
|                       | YDB-8        | 62.9  | 61.6  | 2.1     |
|                       | YDB-9        | 58.7  | 58.4  | 0.5     |

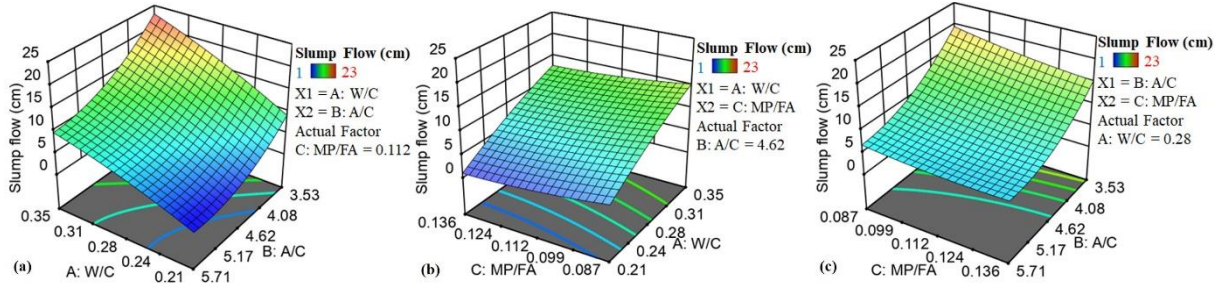
Geliştirilen modele ait değişkenlerin, yanıtlar üzerindeki sonuçlarını daha iyi açıklayabilmek için pertürbasyon eğrileri kullanılmaktadır. Değişkenlerin  $f_c$ -3 gün ve slump değerlerini tahmin etmek için geliştirilen modele ait değişkenlerin etkilerini açıklayan pertürbasyon eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde W/C oranı 0.21-0.28 aralığındayken  $f_c$ -3 gün değerlerinin arttığı, 0.28-0.35 aralığında ise  $f_c$ -3 gün değerlerinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C miktarı arttıkça  $f_c$ -3 gün değerlerinde azalma meydana gelmektedir. MP/FA oranı 0.087-0.112 aralığındayken  $f_c$ -3 gün değerleri artmakta, 0.112-0.136 aralığında ise  $f_c$ -3 gün değerleri azalmaktadır.

Slump değerine ait eğri incelendiğinde W/C oranı arttıkça slump değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C ve MP/FA oranları arttıkça slump değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Pertürbasyon eğrilerinde 0.28, 4.62 olarak verilen değerler, değişkenlere ait en düşük ve en yüksek değerlerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Bu değerler, pertürbasyon eğrisinde 0 noktasına karşılık gelen değerleri belirtmektedir.

**Şekil 3.** Geliştirilen modelin  $f_c$ -3 gün ve slump değerlerine ait pertürbasyon eğrileri

Modellere ait sonuçların en iyi şekilde görselleştirilmesi için üç boyutlu etki grafikleri kullanılmaktadır. Slump için geliştirilen modele ait üç boyutlu etki grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Bu etki grafiği incelendiğinde W/C oranı arttıkça slump değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C ve MP/FA oranları arttıkça slump değerinin azaldığı üç boyutlu etki grafiğinden açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, A/C oranı arttıkça karışımdaki agrega miktarının artmasıdır. Böylece, karışımın su emme miktarı artmakta ve daha kuru bir karışım elde edilmektedir.





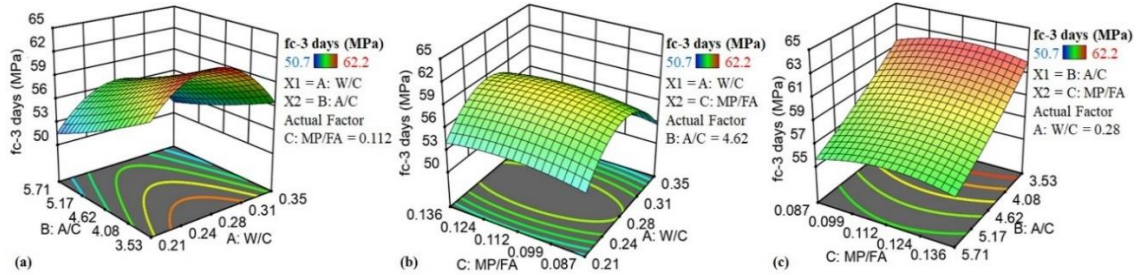
Şekil 4. Slump değerine ait üç boyutlu etki grafiği

#### 4.2. Basınç Dayanımı

Betonun kullanımının yaygınlaşması ile beraber, beton üzerine yapılan teknik ve akademik araştırmalar artmış ve yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, betonun kalitesini belirlemek için en etkin yolun betonun basınç dayanımını belirlemek olduğu ortaya konulmuştur [18]. Basınç dayanımı sonuçları; kalite kontrol, kalıp sıyırma süreleri, kür süreleri, araştırma çalışmaları ve betonun yerinde dayanımını belirlemek için kullanılabilir [19].

Geliştirilen modelin tahmin ettiği  $f_{c-3}$  gün ve BHO değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Geliştirilen model dikkate alındığında  $f_{c-3}$  gün değerlerine ait BHO değerlerinin hepsi %5’in altında kalmaktadır. Böylece, geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Böylece, bu model kullanılarak erken yaş beton basınç dayanımının pratik ve ekonomik bir şekilde tespit edildiği de görülmüştür.

Geliştirilen modelde  $f_{c-3}$  gün değerlerini tahmin etmek için geliştirilen modele ait üç boyutlu etki grafikleri Şekil 5’te verilmiştir. Bu etki grafikleri incelendiğinde W/C miktarı 0.21-0.28 aralığındayken  $f_{c-3}$  gün değerleri artmakta, 0.28-0.35 aralığında azalmaktadır. Bunun en büyük nedeni W/C oranı 0.21’de betonun işlenebilirliğinin istenilen düzeyde olmamasıdır. Böylece, betonun dayanımı incelendiğinde betonun işlenebilirliğinin ne kadar önemli olduğu görülmüştür. Etki grafikleri incelendiğinde  $f_{c-3}$  gün değerleri için optimum W/C oranının 0.28 olduğu da görülmektedir. Aynı zamanda A/C miktarı azaldıkça  $f_{c-3}$  gün değerlerinin arttığı görülmektedir. Çünkü A/C miktarı azaldıkça çimento dozajı artmakta ve buna bağlı olarak da basınç dayanımı artmaktadır. Ayrıca, MP/FA oranı 0.087-0.112 aralığında  $f_{c-3}$  gün değerleri artmakta, 0.112-0.136 aralığında azalmaktadır. Bunun nedeni mermer tozunun optimum değere kadar basınç dayanımını artırması, optimum değerden sonra basınç dayanımı değerlerinde olumsuz etki yaratmasıdır.

Şekil 5.  $f_{c-3}$  gün değerine ait üç boyutlu etki grafiği

#### 5. Sonuçlar

Betonun kalitesini belirlemek için taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle beton basınç dayanımı ve slump değerlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada farklı değişkenler kullanılarak RSM yardımıyla ÇYDB’lerin taze ve sertleşmiş beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model hazırlanan 9 kontrol serisi üzerinde test edilmiş ve modelin etkinliği incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ve modele ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Model’de W/C, A/C ve MP/FA değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu değişkenlerin beraber kullanılmasının sebebi taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde oldukça etkili olmalarıdır. Ayrıca literatürde bu

değişkenlerin birlikte kullanılmasıyla üretilen ÇYDB'lere rastlanılmamıştır. Geliştirilen model incelendiğinde belirlilik katsayılarının slump ve  $f_c-3$  gün için 0.90'ın üzerinde çıkmıştır.

- Üretilen ÇYDB numunelerinin taze beton özelliklerini belirlemek için RSM tabanlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model incelendiğinde betonların slump değerleri hesaplanırken ARD değerleri %20'ye kadar çıkmaktadır. Ancak, plastik ve akıcı kıvamına sahip olan betonlarda ARD değerlerinin çoğu %10'un altında kalmaktadır. Günümüzde üretilen betonların çoğu plastik ve akıcı kıvamına sahiptir. Bu nedenle, geliştirilen modelin uygulamada kullanılmasının önemli avantajlar sağlayacağı düşünülmektedir.
- Üretilen ÇYDB numunelerinin erken yaş dayanımlarını incelemek amacıyla 3. günde numuneler teste tabi tutulmuşlardır. Bu çalışmada  $f_c-3$  gün için bir RSM modeli geliştirilmiştir. Bu model yardımıyla erken yaş dayanımları yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Özellikle kalıp alma sürelerinin, yani erken yaş dayanımının önemli olduğu büyük ve prestijli inşaatlarda bu modellerin kullanılmasının önemli kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.
- Bu çalışmada erken yaş beton basınç dayanımı ve slump değerlerini tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için RSM tabanlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model incelendiğinde BHO değerlerinin genelinin %10'un altında kaldığı görülmüştür. Böylece, RSM kullanılarak geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Son yıllarda RSM'in beton teknolojisinde kullanımında giderek yaygınlaşmaktadır.

## Teşekkür

Yazarlardan, K.E.A., fikir sahibi, T.D. ve M.U. deneyleri gerçekleştirdi. K.E.A, T.D ve M.U. sonuçları yorumladı, T.D., makaleyi yazdı.

## Kaynaklar

- [1] A. C. I. C. 363, Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10). ACI, 2010.
- [2] İ. B. Topçu and A. Uğurlu, "TS 500/2000 Standardının Beton Açısından İncelenmesi," ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, vol. 14, pp. 492–499, 2002.
- [3] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, and Z. Fang, "A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties," Constr. Build. Mater., vol. 96, pp. 368–377, 2015.
- [4] V. S. Ramachandran, Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. William Andrew, 1996.
- [5] A. Köken, M. A. Köroğlu, and F. Yonar, "Atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliği," 2008.
- [6] E. Güneysi, M. Gesoğlu, Z. Algin, and K. Mermerdaş, "Optimization of concrete mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method," Compos. Part B Eng., vol. 60, pp. 707–715, 2014.
- [7] D. K. Ashish, "Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development," J. Clean. Prod., vol. 211, pp. 716–729, 2019.
- [8] K. E. Alyamaç and A. B. Aydın, "Concrete properties containing fine aggregate marble powder," KSCE J. Civ. Eng., vol. 19, no. 7, pp. 2208–2216, 2015.
- [9] V. Singhal, R. Nagar, and V. Agrawal, "Use of marble slurry powder and fly ash to obtain sustainable concrete," Mater. Today Proc., vol. 44, pp. 4387–4392, 2021.
- [10] Z. Wu, C. Shi, K. H. Khayat, and L. Xie, "Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC," Constr. Build. Mater., vol. 182, 2018.
- [11] Ö. ve U. K. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, "TS EN 197-1," Turkey, 2012.
- [12] O. SOYKAN, Ö. Cengiz, and Ö. Cenk, "Arduvaz ve Andezit'in Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 19, no. 1, 2015.
- [13] S. Ray, M. Haque, T. Ahmed, and T. T. Nahin, "Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber," J. King Saud Univ. Sci., 2021.
- [14] K. E. Alyamac, E. Ghafari, and R. Ince, "Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method," J. Clean. Prod., vol. 144, pp. 192–202, 2017.
- [15] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons, 2016.
- [16] S. Pyo and H. K. Kim, "Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder," Constr. Build. Mater., vol. 131, 2017.
- [17] "Design-expert software." Inc., S.-E, Minneapolis, MN, USA., 2016.
- [18] D. A. Abrams, "Water-cement ratio as a basis of concrete quality," in Journal Proceedings, 1927, vol. 23, no. 2, pp. 452–457.
- [19] R. Jones, Non-destructive testing of concrete. University Press, 1962.