**Supplementary File 3.** Detailed performance comparisons between tuned autoencoder (AE) and HMM-based imputation tools (Minimac4, Beagle5, and Impute5).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Dataset** | **Array** | **MAF** | **AE (tuned) vs Minimac4** | **AE (tuned) vs Beagle5** | **AE (tuned) vs Impute5** | **Minimac4 vs Beagle5** | **Minimac4 vs Impute5** | **Beagle5 vs Impute5** | **AE (tuned)** | **Minimac4** | **Beagle5** | **Impute5** |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.001-0.005)** | 3.84e-306\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 1.30e-122\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.141±0.001 | 0.128±0.001 | 0.129±0.001 | 0.121±0.001 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.005-0.01)** | 1.37e-48\*\*\* | 3.39e-280\*\*\* | 8.96e-86\*\*\* | 3.12e-127\*\*\* | 1.13e-08\*\*\* | 1.22e-68\*\*\* | 0.280±0.001 | 0.266±0.001 | 0.258±0.001 | 0.262±0.001 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.01-0.05)** | 2.62e-48\*\*\* | 6.14e-119\*\*\* | 3.54e-72\*\*\* | 4.61e-23\*\*\* | 8.85e-05\*\*\* | 7.81e-09\*\*\* | 0.490±0.001 | 0.467±0.001 | 0.453±0.001 | 0.461±0.001 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.05-0.1)** | 2.11e-05\*\*\* | 4.44e-49\*\*\* | 2.36e-04\*\* | 3.26e-23\*\*\* | 7.11E-01 | 3.53e-24\*\*\* | 0.728±0.002 | 0.703±0.002 | 0.684±0.002 | 0.698±0.002 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.1-0.2)** | 1.17e-15\*\*\* | 2.04e-50\*\*\* | 3.36e-09\*\*\* | 6.41e-11\*\*\* | 6.50E-02 | 8.64e-16\*\*\* | 0.793±0.002 | 0.763±0.002 | 0.753±0.002 | 0.758±0.002 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.2-0.3)** | 1.02e-16\*\*\* | 5.61e-25\*\*\* | 6.87e-09\*\*\* | 5.09E-02 | 2.67e-02\* | 5.57e-05\*\*\* | 0.825±0.002 | 0.794±0.002 | 0.790±0.002 | 0.789±0.002 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.3-0.4)** | 2.41e-19\*\*\* | 3.04e-28\*\*\* | 2.92e-09\*\*\* | 9.05E-02 | 1.08e-02\* | 3.17e-05\*\*\* | 0.834±0.002 | 0.799±0.002 | 0.798±0.002 | 0.795±0.002 |
| **MESA** | **Affymetrix 6.0** | **[0.4-0.5)** | 2.46e-18\*\*\* | 7.67e-23\*\*\* | 3.85e-11\*\*\* | 3.80E-01 | 7.17E-02 | 9.77e-03\* | 0.842±0.002 | 0.806±0.002 | 0.805±0.003 | 0.801±0.003 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.001-0.005)** | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 1.04e-106\*\*\* | 1.10e-95\*\*\* | 0.145±0.001 | 0.117±0.001 | 0.132±0.001 | 0.108±0.001 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.005-0.01)** | 7.45e-142\*\*\* | 7.16e-191\*\*\* | 4.41e-242\*\*\* | 2.76e-23\*\*\* | 8.03e-18\*\*\* | 1.28E-01 | 0.255±0.001 | 0.226±0.001 | 0.249±0.001 | 0.216±0.001 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.01-0.05)** | 2.85e-128\*\*\* | 6.38e-41\*\*\* | 1.57e-181\*\*\* | 1.76e-12\*\*\* | 3.39e-07\*\*\* | 2.75e-34\*\*\* | 0.432±0.001 | 0.400±0.001 | 0.418±0.001 | 0.393±0.001 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.05-0.1)** | 5.91e-21\*\*\* | 4.88e-09\*\*\* | 2.14e-23\*\*\* | 2.68e-03\* | 4.80E-01 | 3.13e-04\*\* | 0.681±0.002 | 0.652±0.002 | 0.657±0.002 | 0.646±0.002 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.1-0.2)** | 1.12e-42\*\*\* | 2.66e-11\*\*\* | 5.58e-37\*\*\* | 9.55e-11\*\*\* | 5.04E-01 | 2.58e-08\*\*\* | 0.791±0.001 | 0.758±0.002 | 0.766±0.002 | 0.752±0.002 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.2-0.3)** | 8.25e-59\*\*\* | 1.62e-15\*\*\* | 5.06e-54\*\*\* | 2.23e-14\*\*\* | 8.15E-01 | 1.07e-12\*\*\* | 0.837±0.001 | 0.796±0.002 | 0.807±0.002 | 0.790±0.002 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.3-0.4)** | 8.13e-81\*\*\* | 7.00e-14\*\*\* | 3.82e-72\*\*\* | 3.98e-26\*\*\* | 8.34E-01 | 2.26e-22\*\*\* | 0.840±0.002 | 0.795±0.002 | 0.810±0.002 | 0.789±0.002 |
| **MESA** | **UKB Axiom** | **[0.4-0.5)** | 5.60e-82\*\*\* | 8.03e-12\*\*\* | 1.69e-79\*\*\* | 6.34e-30\*\*\* | 6.20E-01 | 3.13e-29\*\*\* | 0.846±0.002 | 0.800±0.002 | 0.819±0.002 | 0.794±0.002 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.001-0.005)** | 6.78e-179\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 8.51e-66\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.174±0.001 | 0.158±0.001 | 0.152±0.001 | 0.148±0.001 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.005-0.01)** | 1.37e-23\*\*\* | 7.31e-253\*\*\* | 5.27e-53\*\*\* | 6.68e-147\*\*\* | 5.95e-08\*\*\* | 1.44e-90\*\*\* | 0.340±0.001 | 0.327±0.001 | 0.301±0.002 | 0.317±0.001 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.01-0.05)** | 1.51e-05\*\*\* | 6.15e-118\*\*\* | 9.61e-14\*\*\* | 2.01e-77\*\*\* | 1.54e-03\* | 6.53e-53\*\*\* | 0.552±0.001 | 0.542±0.001 | 0.510±0.001 | 0.537±0.001 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.05-0.1)** | 8.96E-01 | 2.53e-52\*\*\* | 1.91E-01 | 2.25e-48\*\*\* | 2.57E-01 | 2.05e-54\*\*\* | 0.759±0.002 | 0.750±0.002 | 0.723±0.002 | 0.749±0.002 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.1-0.2)** | 7.72e-19\*\*\* | 3.14e-57\*\*\* | 5.03e-09\*\*\* | 5.40e-11\*\*\* | 6.88e-03\* | 2.65e-19\*\*\* | 0.828±0.001 | 0.806±0.002 | 0.797±0.002 | 0.805±0.002 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.2-0.3)** | 2.53e-32\*\*\* | 2.68e-65\*\*\* | 6.69e-18\*\*\* | 8.66e-06\*\*\* | 6.61e-03\* | 6.35e-12\*\*\* | 0.866±0.002 | 0.838±0.002 | 0.834±0.002 | 0.838±0.002 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.3-0.4)** | 4.87e-32\*\*\* | 3.52e-34\*\*\* | 5.66e-20\*\*\* | 8.88E-01 | 3.34e-02\* | 2.46e-02\* | 0.864±0.002 | 0.836±0.002 | 0.835±0.002 | 0.834±0.002 |
| **MESA** | **Omni 1.5M** | **[0.4-0.5)** | 2.05e-53\*\*\* | 1.11e-22\*\*\* | 1.92e-38\*\*\* | 3.17e-08\*\*\* | 7.47E-02 | 4.31e-04\*\* | 0.879±0.002 | 0.847±0.002 | 0.854±0.002 | 0.845±0.002 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.001-0.005)** | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 5.06e-19\*\*\* | 0.212±0.001 | 0.183±0.001 | 0.170±0.001 | 0.170±0.001 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.005-0.01)** | 9.46e-58\*\*\* | 4.82e-140\*\*\* | 2.37e-167\*\*\* | 1.84e-26\*\*\* | 1.44e-39\*\*\* | 1.40e-02\* | 0.359±0.003 | 0.307±0.003 | 0.289±0.003 | 0.283±0.003 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.01-0.05)** | 4.01e-43\*\*\* | 2.50e-149\*\*\* | 1.02e-88\*\*\* | 6.52e-34\*\*\* | 9.91e-12\*\*\* | 1.85e-06\*\*\* | 0.616±0.002 | 0.566±0.002 | 0.536±0.002 | 0.544±0.002 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.05-0.1)** | 4.80e-19\*\*\* | 2.25e-55\*\*\* | 7.24e-16\*\*\* | 7.05e-12\*\*\* | 5.76E-01 | 7.95e-12\*\*\* | 0.820±0.002 | 0.783±0.003 | 0.761±0.003 | 0.769±0.003 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.1-0.2)** | 1.08e-46\*\*\* | 4.14e-53\*\*\* | 3.92e-34\*\*\* | 2.40E-01 | 1.23E-01 | 1.03e-02\* | 0.869±0.002 | 0.830±0.002 | 0.821±0.002 | 0.820±0.002 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.2-0.3)** | 7.27e-35\*\*\* | 4.70e-38\*\*\* | 1.12e-23\*\*\* | 5.90E-01 | 9.11E-02 | 2.47e-02\* | 0.889±0.002 | 0.856±0.002 | 0.850±0.002 | 0.848±0.002 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.3-0.4)** | 1.93e-49\*\*\* | 3.99e-32\*\*\* | 1.43e-35\*\*\* | 7.35e-03\* | 1.17E-01 | 3.62E-01 | 0.888±0.002 | 0.851±0.002 | 0.848±0.003 | 0.844±0.002 |
| **Wellderly** | **Affymetrix 6.0** | **[0.4-0.5)** | 8.77e-51\*\*\* | 7.23e-32\*\*\* | 5.15e-31\*\*\* | 3.34e-03\* | 1.11e-02\* | 8.04E-01 | 0.900±0.002 | 0.861±0.002 | 0.859±0.002 | 0.855±0.002 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.001-0.005)** | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 1.56e-98\*\*\* | 2.93e-173\*\*\* | 5.08e-13\*\*\* | 0.240±0.001 | 0.188±0.001 | 0.179±0.001 | 0.176±0.001 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.005-0.01)** | 1.42e-78\*\*\* | 3.64e-137\*\*\* | 4.44e-134\*\*\* | 8.25e-14\*\*\* | 2.51e-11\*\*\* | 3.79E-01 | 0.463±0.003 | 0.392±0.003 | 0.374±0.003 | 0.373±0.003 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.01-0.05)** | 3.20e-43\*\*\* | 4.20e-124\*\*\* | 1.06e-54\*\*\* | 5.93e-22\*\*\* | 3.75e-02\* | 1.29e-12\*\*\* | 0.761±0.002 | 0.714±0.002 | 0.694±0.002 | 0.701±0.002 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.05-0.1)** | 1.63e-62\*\*\* | 1.70e-80\*\*\* | 1.47e-32\*\*\* | 6.88e-03\* | 7.27e-05\*\*\* | 1.74e-10\*\*\* | 0.911±0.001 | 0.879±0.002 | 0.868±0.002 | 0.875±0.002 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.1-0.2)** | 1.21e-141\*\*\* | 4.36e-96\*\*\* | 4.21e-87\*\*\* | 1.88e-04\*\* | 2.59e-05\*\*\* | 5.92E-01 | 0.930±0.001 | 0.893±0.001 | 0.891±0.001 | 0.889±0.001 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.2-0.3)** | 4.84e-219\*\*\* | 7.82e-121\*\*\* | 4.78e-154\*\*\* | 9.07e-15\*\*\* | 9.63e-04\*\* | 3.48e-05\*\*\* | 0.944±0.001 | 0.902±0.001 | 0.907±0.001 | 0.899±0.001 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.3-0.4)** | 5.32e-257\*\*\* | 3.33e-135\*\*\* | 1.46e-196\*\*\* | 1.38e-21\*\*\* | 4.46e-02\* | 4.42e-12\*\*\* | 0.940±0.001 | 0.892±0.002 | 0.899±0.002 | 0.886±0.002 |
| **Wellderly** | **UKB Axiom** | **[0.4-0.5)** | 0.00e+00\*\*\* | 5.32e-156\*\*\* | 1.60e-244\*\*\* | 1.62e-34\*\*\* | 1.02e-02\* | 6.59e-19\*\*\* | 0.949±0.001 | 0.900±0.001 | 0.908±0.002 | 0.895±0.002 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.001-0.005)** | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 2.69e-183\*\*\* | 1.06e-207\*\*\* | 7.98e-03\* | 0.255±0.001 | 0.215±0.001 | 0.197±0.001 | 0.203±0.001 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.005-0.01)** | 1.20e-46\*\*\* | 1.49e-125\*\*\* | 1.09e-102\*\*\* | 8.69e-25\*\*\* | 4.07e-15\*\*\* | 1.55e-02\* | 0.428±0.003 | 0.376±0.003 | 0.347±0.003 | 0.355±0.003 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.01-0.05)** | 1.67e-13\*\*\* | 1.07e-93\*\*\* | 1.95e-25\*\*\* | 2.72e-36\*\*\* | 1.68e-03\* | 7.71e-19\*\*\* | 0.706±0.002 | 0.671±0.002 | 0.641±0.002 | 0.653±0.002 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.05-0.1)** | 5.40e-07\*\*\* | 6.60e-59\*\*\* | 8.37e-04\*\* | 1.59e-26\*\*\* | 1.12E-01 | 1.08e-31\*\*\* | 0.883±0.002 | 0.862±0.002 | 0.844±0.002 | 0.854±0.002 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.1-0.2)** | 2.89e-42\*\*\* | 1.73e-55\*\*\* | 1.08e-22\*\*\* | 4.85e-02\* | 1.70e-03\* | 1.76e-06\*\*\* | 0.915±0.002 | 0.889±0.002 | 0.885±0.002 | 0.883±0.002 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.2-0.3)** | 2.56e-68\*\*\* | 6.21e-68\*\*\* | 9.93e-47\*\*\* | 8.71E-01 | 3.06e-02\* | 6.20E-02 | 0.933±0.001 | 0.907±0.002 | 0.904±0.002 | 0.901±0.002 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.3-0.4)** | 3.99e-89\*\*\* | 1.54e-58\*\*\* | 3.55e-68\*\*\* | 1.15e-04\*\* | 1.52E-01 | 3.57e-02\* | 0.927±0.002 | 0.896±0.002 | 0.897±0.002 | 0.892±0.002 |
| **Wellderly** | **Omni 1.5M** | **[0.4-0.5)** | 1.88e-101\*\*\* | 5.27e-60\*\*\* | 2.12e-68\*\*\* | 6.34e-07\*\*\* | 1.44e-02\* | 2.86e-02\* | 0.933±0.002 | 0.902±0.002 | 0.904±0.002 | 0.897±0.002 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.001-0.005)** | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 4.57e-76\*\*\* | 0.115±0.000 | 0.110±0.001 | 0.094±0.000 | 0.097±0.000 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.005-0.01)** | 9.42e-37\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 1.41e-180\*\*\* | 1.23e-172\*\*\* | 2.29e-59\*\*\* | 6.90e-31\*\*\* | 0.255±0.001 | 0.245±0.001 | 0.212±0.001 | 0.224±0.001 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.01-0.05)** | 1.27e-19\*\*\* | 5.35e-251\*\*\* | 5.51e-161\*\*\* | 3.40e-124\*\*\* | 1.46e-68\*\*\* | 3.88e-09\*\*\* | 0.477±0.001 | 0.461±0.001 | 0.416±0.001 | 0.428±0.001 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.05-0.1)** | 5.84e-07\*\*\* | 1.05e-90\*\*\* | 3.49e-67\*\*\* | 5.86e-46\*\*\* | 3.24e-32\*\*\* | 4.07e-02\* | 0.720±0.002 | 0.695±0.002 | 0.662±0.002 | 0.660±0.002 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.1-0.2)** | 4.01e-09\*\*\* | 6.45e-78\*\*\* | 6.97e-76\*\*\* | 1.44e-32\*\*\* | 1.49e-33\*\*\* | 4.55E-01 | 0.791±0.002 | 0.765±0.002 | 0.747±0.002 | 0.733±0.002 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.2-0.3)** | 2.52e-13\*\*\* | 1.54e-56\*\*\* | 2.43e-64\*\*\* | 9.52e-15\*\*\* | 2.08e-20\*\*\* | 6.08E-02 | 0.813±0.002 | 0.786±0.002 | 0.774±0.002 | 0.760±0.002 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.3-0.4)** | 5.85e-16\*\*\* | 6.47e-64\*\*\* | 7.68e-72\*\*\* | 2.25e-15\*\*\* | 9.49e-21\*\*\* | 7.35E-02 | 0.835±0.002 | 0.806±0.002 | 0.793±0.002 | 0.782±0.002 |
| **HGDP** | **Affymetrix 6.0** | **[0.4-0.5)** | 2.89e-16\*\*\* | 7.59e-40\*\*\* | 9.69e-63\*\*\* | 7.01e-06\*\*\* | 3.98e-16\*\*\* | 7.45e-05\*\*\* | 0.836±0.002 | 0.805±0.002 | 0.797±0.002 | 0.781±0.002 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.001-0.005)** | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 1.59e-03\* | 0.109±0.000 | 0.096±0.000 | 0.086±0.000 | 0.080±0.000 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.005-0.01)** | 6.42e-154\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 1.60e-75\*\*\* | 4.56e-76\*\*\* | 5.59E-01 | 0.233±0.001 | 0.206±0.001 | 0.193±0.001 | 0.180±0.001 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.01-0.05)** | 1.58e-100\*\*\* | 7.46e-277\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 7.30e-49\*\*\* | 2.07e-107\*\*\* | 1.88e-12\*\*\* | 0.455±0.001 | 0.421±0.001 | 0.396±0.001 | 0.382±0.001 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.05-0.1)** | 9.25e-18\*\*\* | 8.34e-48\*\*\* | 3.52e-139\*\*\* | 2.05e-08\*\*\* | 9.53e-57\*\*\* | 2.15e-24\*\*\* | 0.746±0.002 | 0.718±0.002 | 0.704±0.002 | 0.678±0.002 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.1-0.2)** | 1.69e-51\*\*\* | 1.48e-73\*\*\* | 1.93e-253\*\*\* | 3.65e-03\* | 9.55e-77\*\*\* | 3.82e-55\*\*\* | 0.817±0.001 | 0.785±0.001 | 0.779±0.001 | 0.748±0.002 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.2-0.3)** | 2.31e-71\*\*\* | 5.99e-63\*\*\* | 4.54e-249\*\*\* | 3.50E-01 | 2.43e-55\*\*\* | 2.29e-60\*\*\* | 0.844±0.001 | 0.808±0.002 | 0.805±0.002 | 0.773±0.002 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.3-0.4)** | 1.63e-104\*\*\* | 4.84e-81\*\*\* | 3.67e-302\*\*\* | 9.67e-03\* | 2.63e-52\*\*\* | 3.67e-70\*\*\* | 0.860±0.001 | 0.819±0.002 | 0.818±0.002 | 0.788±0.002 |
| **HGDP** | **UKB Axiom** | **[0.4-0.5)** | 3.74e-93\*\*\* | 5.24e-50\*\*\* | 8.92e-262\*\*\* | 5.86e-08\*\*\* | 2.88e-45\*\*\* | 3.80e-83\*\*\* | 0.861±0.001 | 0.821±0.002 | 0.827±0.002 | 0.791±0.002 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.001-0.005)** | 5.46e-226\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 3.78e-302\*\*\* | 1.17e-153\*\*\* | 0.139±0.001 | 0.135±0.001 | 0.112±0.001 | 0.117±0.001 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.005-0.01)** | 1.04e-09\*\*\* | 0.00e+00\*\*\* | 2.39e-110\*\*\* | 2.55e-221\*\*\* | 2.71e-56\*\*\* | 1.73e-59\*\*\* | 0.292±0.001 | 0.290±0.001 | 0.240±0.001 | 0.261±0.001 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.01-0.05)** | 4.61E-01 | 7.26e-252\*\*\* | 8.61e-99\*\*\* | 1.15e-221\*\*\* | 3.08e-85\*\*\* | 2.14e-34\*\*\* | 0.513±0.001 | 0.510±0.001 | 0.451±0.001 | 0.474±0.001 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.05-0.1)** | 1.58E-01 | 5.99e-77\*\*\* | 2.18e-41\*\*\* | 5.10e-79\*\*\* | 2.87e-45\*\*\* | 2.85e-05\*\*\* | 0.772±0.002 | 0.764±0.002 | 0.730±0.002 | 0.730±0.002 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.1-0.2)** | 1.63e-08\*\*\* | 3.95e-95\*\*\* | 7.52e-111\*\*\* | 1.44e-43\*\*\* | 6.73e-57\*\*\* | 5.16e-03\* | 0.822±0.001 | 0.805±0.002 | 0.787±0.002 | 0.774±0.002 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.2-0.3)** | 2.18e-14\*\*\* | 5.45e-80\*\*\* | 1.70e-107\*\*\* | 2.92e-25\*\*\* | 5.09e-43\*\*\* | 7.27e-05\*\*\* | 0.851±0.002 | 0.832±0.002 | 0.819±0.002 | 0.805±0.002 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.3-0.4)** | 1.09e-34\*\*\* | 1.27e-114\*\*\* | 5.18e-157\*\*\* | 7.10e-21\*\*\* | 4.34e-44\*\*\* | 4.80e-07\*\*\* | 0.873±0.001 | 0.848±0.002 | 0.836±0.002 | 0.821±0.002 |
| **HGDP** | **Omni 1.5M** | **[0.4-0.5)** | 2.78e-29\*\*\* | 8.21e-50\*\*\* | 4.50e-131\*\*\* | 1.90e-03\* | 2.67e-37\*\*\* | 1.11e-23\*\*\* | 0.867±0.002 | 0.843±0.002 | 0.837±0.002 | 0.817±0.002 |

Validation accuracies were stratified by dataset (MESA, Wellderly, HGDP), genotype array platform (Affymetrix 6.0, UKB Axiom, Omni 1.5M), and MAF bin. We applied Wilcoxon rank-sum tests to compare the HMM-based tools to the reference tuned autoencoder (AE). \* represents p-values ≤ 0.05, \*\* indicates p-values ≤ 0.001, and \*\*\* indicates p-values ≤ 0.0001.